

Schumann, Holger

Thema: Erarbeitung einer Reparaturtechnologie für die Instandsetzung eines
Brückenkrans, zur Verlängerung der Restnutzungsdauer.

eingereicht als

Diplomarbeit

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA (FH)

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Stahl- und Metallbau

Königslutter, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer: Dipl. Ing. Christian Eckart

vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Danksagung

Hiermit bedanke ich mich zunächst bei Herrn Christian Eckart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner, ohne deren Zustimmung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Desweiteren danke ich Herrn Horst Hobler für die zusätzliche Betreuung seitens der Hochschule.

Ich möchte mich auch bei allen Mitarbeitern des Kranbetriebs der SZST Salzgitter Service und Technik GmbH bedanken, die mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Natürlich danke ich auch meiner Familie: Meinen Eltern, die mir mitunter die finanzielle Seite des Studiums ermöglicht haben und bei all meinen Entscheidungen immer hinter mir standen sowie meinen beiden Schwestern und meinen Großeltern, die mir auch in schwierigeren Zeiten immer den Rücken gestärkt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	VORSTELLUNG DES DIPLOMTHEMAS	1
2	SPEZIFIKATIONEN DES KRAN 7.....	2
2.1	Tätigkeitsfeld	2
2.2	Technische Angaben	3
2.3	Einstufung	4
3	SCHADENSFESTSTELLUNGEN	5
3.1	Schadensfeststellung I.....	5
3.1.1	Rissursachen der Schadensfeststellung I.....	7
3.1.2	Werkstoffuntersuchung.....	9
3.2	Schadensfeststellung II	11
3.2.1	Schadensursache und Folgen der Schadensfeststellung II	11
3.2.2	Schadensbilder des oberen Katzgerüsts	12
3.2.3	Endschaltersystem des Hubwerkes	12
4	ALLGEMEINER BERECHNUNGSTEIL.....	13
4.1	Beschreibung der Laufkatze.....	14
4.2	Zeichnungen.....	16
4.3	Werkstoff	16
4.4	Einstufung und Arbeitsgeschwindigkeiten	16
4.5	Berechnungsmodell.....	17
4.6	Querschnitte	18
4.7	Struktur des Berechnungsmodells (RSTAB)	18
5	LASTANNAHMEN NACH DIN 15018.....	21
5.1	Hauptlasten	21
5.1.1	Eigenlasten.....	21
5.1.2	Hublasten	21
5.1.3	Massenkräfte aus Antrieben.....	22
5.1.4	Wirkungen lotrechter Massenkräfte.....	22
5.2	Bestimmung der Lastfälle nach DIN 15018.....	23
5.2.1	LF1 Eigenlast G	24
5.2.2	LF2 Hublast P_0 (ohne Nutzlast)	24
5.2.3	LF3 Hublast P	24
5.2.4	LF4 Massenkräfte aus Antrieb Kranfahrt Kr	25

5.2.5	LF5 Massenkräfte aus Antrieb Katzfahrt K_a	27
5.3	Bestimmung der Lastfallkombinationen nach DIN 15018	27
6	LASTANNAHMEN NACH DIN EN 13001-2	29
6.1	Regelmäßige Lasten	29
6.1.1	Masse der Katze	30
6.1.2	Masse der Hublast	30
6.1.3	Massenkräfte aus Antrieben	30
6.1.4	dynamische Faktoren	30
6.2	Bestimmung der Lastfälle nach DIN 13001-2	33
6.2.1	LF11 Masse Katze	33
6.2.2	LF12 Masse Hublast ohne Nutzlast	33
6.2.3	LF13 Masse Hublast	33
6.2.4	LF14 Massenkräfte aus Antrieb Kranfahrt	33
6.2.5	LF15 Massenkräfte aus Antrieb Katzfahrt	33
6.3	Bestimmung der Lastfallkombinationen nach DIN EN 13001-2	34
7	NACHWEISE FÜR SCHADENSFESTSTELLUNG I (QUERSCHNITT 9).	35
7.1	Bestimmung der Schnittgrößen und Spannungen an Stelle $x = 0,73\text{m}$	35
7.1.1	Schnittgrößen und Spannungen für LG1 bis LG6 (DIN 15018)	36
7.1.2	Schnittgrößen und Spannungen für LG11 bis LG16 (DIN EN 13001)	37
7.2	Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 15018	38
7.2.1	vorhandene Ober- und Unterspannung	38
7.2.2	Kerbfälle nach DIN 15018	39
7.2.3	Berechnungskollektiv	40
7.2.4	Bestimmung der zulässigen Spannung $\sigma_{D(-1)}$	40
7.2.5	Bestimmung der zulässigen Oberspannung $\sigma_{zul\sigma_{DZ(\kappa)}}$	41
7.2.6	Betriebsfestigkeitsnachweis für 47 Jahre Laufzeit (W2)	43
7.2.7	Betriebsfestigkeitsnachweis für 4 Jahre Restlaufzeit (K3)	43
7.3	Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach DIN EN 1993-1-9	44
7.3.1	vorhandene Ober- und Unterspannung	44
7.3.2	Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$	45
7.3.3	Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9	45
7.3.4	Spannungsspielzahlen N	46
7.3.5	Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F,f}$ und $\gamma_{M,f}$	47
7.3.6	Bestimmung der „zulässigen.“ Schwingbreiten $\Delta\sigma$	48
8	NORMENGEGENÜBERSTELLUNG	51

9	NACHWEIS FÜR SCHADENSFESTSTELLUNG II (QUERSCHNITT 5)..	53
9.1	Bestimmung des maßgebenden Lastfalls für Querschnitt 5	55
9.2	Widerstandsmomente für unterschiedliche Querschnittshöhe h_i	55
9.3	Biegemomente und Widerstandsmomente für Stellen x_i	56
10	REPARATURTECHNOLOGIE I (KATZRAHMEN)	58
10.1	Reparaturvorschläge.....	58
10.1.1	Variante A	58
10.1.2	Variante B	59
10.1.3	Variante C	60
10.2	Sanierung der Risse am Katzrahmen	60
10.2.1	Reparaturablauf.....	61
10.2.2	Abbildungen der Reparaturschweißungen von Pos.1 und Pos. 2	62
10.2.3	Schweißnahtnachbehandlung „HiFIT“	63
11	REPARATURTECHNOLOGIE II (KATZGERÜST)	65
11.1	Vorbereitung	65
11.2	Bestimmung eines Reparaturlastfalls.....	65
11.2.1	Restquerschnitt QS5‘	65
11.2.2	Reparaturlastfall für QS5‘	66
11.2.3	Bestimmung des Biegemomentes für den Restquerschnitt QS5‘	66
11.2.4	Nachweis des Restquerschnitts QS5‘	67
11.3	Reparatur des Stegblechbereiches.....	68
11.3.1	Entfernen der verformten Stegbleche.....	68
11.3.2	Durchführung der Reparaturschweißungen	68
11.4	Reparatur der Montagestöße / Kopfplattenstöße:	70
12	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	74
13	LITERATUR.....	77
14	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	79
15	TABELLENVERZEICHNIS.....	82
16	SOFTWARE.....	83
17	ERKLÄRUNG	84
18	ANHANG A.....	85
19	ANHANG B.....	96
20	ANHANG C.....	100

Formelzeichen und Abkürzungen

$\gamma_{M,f}$	Teilsicherheits-Faktor des Werkstoffwiderstandes nach Eurocode 3
$\gamma_{F,f}$	Teilsicherheits-Faktor der Beanspruchung nach Eurocode 3
$\varphi_{1...7}$	dynamischer Faktor nach DIN EN 13001
φ_e	Eigenlastbeiwert bzw. Eigenschwingbeiwert nach DIN 15018
κ	Grenzspannungsverhältnis nach DIN 15018
ψ	Hublastbeiwert nach DIN 15018
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite (Längsspannungen)
$\Delta\tau$	Spannungsschwingbreite (Schubspannungen)
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	Grenzwertwert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen
$\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$	schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bezogen auf n_{\max} (Betriebsbeanspruchung)
$\Delta\sigma_D, \Delta\tau_D$	Dauerfestigkeit bei N_D Schwingspielen ($N = 5 \cdot 10^6$)
FAT	Ermüdungsklasse des Kerbfalls bei $N = 2 \cdot 10^6$
a_{Katze}	Beschleunigung der Katze
a_{Kran}	Beschleunigung des Krans
B	Beanspruchungsgruppe nach DIN 15018 (B1...B6)
FA	Spannungsanalyse mit RSTAB-Zusatzmodul „STAHL“ (FA1...FA16)
G	Eigenlast nach DIN 15018
H	Hubklasse nach DIN 15018 (H1...H4)
K311	Kerbfallnummer nach DIN 15018 (Kerbfall 3)
Ka	Massenkräfte aus Katzfahrt
Kr	Massenkräfte aus Kranfahrt

LF	Lastfall (LF1...LF15)
LG	Lastgruppe (LG1...LG16)
m	Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve
N _i	Spannungsspielbereich nach DIN 15018 (N1...N4)
P	Hublast nach DIN 15018
P ₀	Hublast ohne Nutzlast nach DIN 15018
S _i	Spannungskollektiv nach DIN 15018 (S ₀ ...S ₃)
v _f	Fahrgeschwindigkeit in m/min
v _h	Hubgeschwindigkeit in m/min
W22	Kerbfallnummer nach DIN 15018 (Kerbfall 2)
WFF	Kranfahrwerkssystem nach DIN 15018: Zentralantrieb
MAG	Metall-Aktiv-Gas-Schweißen
CO ₂	Kohlendioxid (Schutzgas, aktiv)
Ar	Argon (Schutzgas, inert)
M21	Mischgas mit 18% CO ₂ und 82% Ar
PA	Schweißposition (Wannenposition)
PB	Schweißposition (Horizontalposition)
PF	Schweißposition („steigend“)
PG	Schweißposition („fallend“)
PD	Schweißposition („horizontale Überkopfposition“)
HiFIT	High Frequency Impact Treatment (hochfrequentes Hämmerverfahren)

1 Vorstellung des Diplomthemas

Thema: Erarbeitung einer Reparaturtechnologie für die Instandsetzung eines Brückenkrans zur Verlängerung der Restnutzungsdauer.

Im Rahmen der Instandhaltung wurden im Bereich des Warmwalzwerkes drei Brückenkrane bezüglich ihrer Nutzungsdauer überprüft, Kran 10, Kran 7 und Kran 9.

Kran 9 wurde letztes Jahr verschrottet und durch einen neuen Kran (Kran 64) ersetzt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll der Kran 7 bezüglich geeigneter Reparaturtechnologien, mit dem Ziel einer Verlängerung der Restnutzungsdauer von zwei bis drei Jahren untersucht werden.

Im weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit wird anhand von Schadensaufnahmen ein Überblick über den Ist-Zustand des Krans vorgestellt. Es werden Untersuchungen im Bereich der Kranstatik durchgeführt sowie dynamische Einwirkungen anhand der Ermüdungsfestigkeit betrachtet. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind Grundlage für die Erarbeitung der Reparaturtechnologien und sollen Aufschluss über die weitere Nutzbarkeit des Kran 7 geben.

Im Warmwalzwerk werden Brammen aus der Stranggussanlage zu Blech gewalzt und mittels Haspel zu einem Coil gewickelt. Diese wiegen bis zu 32t. Mit Hilfe von Krananlagen werden sie auf die gewünschten Transportrouten geschickt. Der Walzprozess befindet sich in einer laufenden Produktionskette, wodurch die Zuverlässigkeit des Krans eine große Rolle spielt. Sobald der Kran ausfällt, kann die Produktion nur noch eingeschränkt bis gar nicht mehr ablaufen.

2 Spezifikationen des Kran 7



Abbildung 1: Zweiträger-Brückenkran 7, max. Nutzlast 32t

2.1 Tätigkeitsfeld

Im Warmwalzwerk der Salzgitter Flachstahl werden Brammen aus der Stranggussanlage zu Blech gewalzt und zu sogenannten Coils gewickelt.

Der Coilversand zur Beize, ins Freilager oder direkt zur Waggonverladung, gehört zum Hauptaufgabenbereich des Kran 7 (Abbildung 2). Gefahren wird in einem Schichtsystem, wodurch der Kran ständig im Einsatz ist. Das warmgewalzte Blech in Form von Coils besitzt nach dem Walzgang noch eine Temperatur von ca. 650°C. Deshalb können diese noch nicht zu ihren Bestimmungsorten weitergeleitet werden, sondern müssen erst abkühlen. Die Umgebungstemperatur in der Halle liegt, je nach Anzahl zwischengelagerter Coils, im Bereich von 0° bis 65°C.



Abbildung 2: Dornkran im Einsatz

2.2 Technische Angaben

In Tabelle 1 sind die wichtigsten technischen Angaben des Krans aufgelistet und Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus einer Dispositionszeichnung.

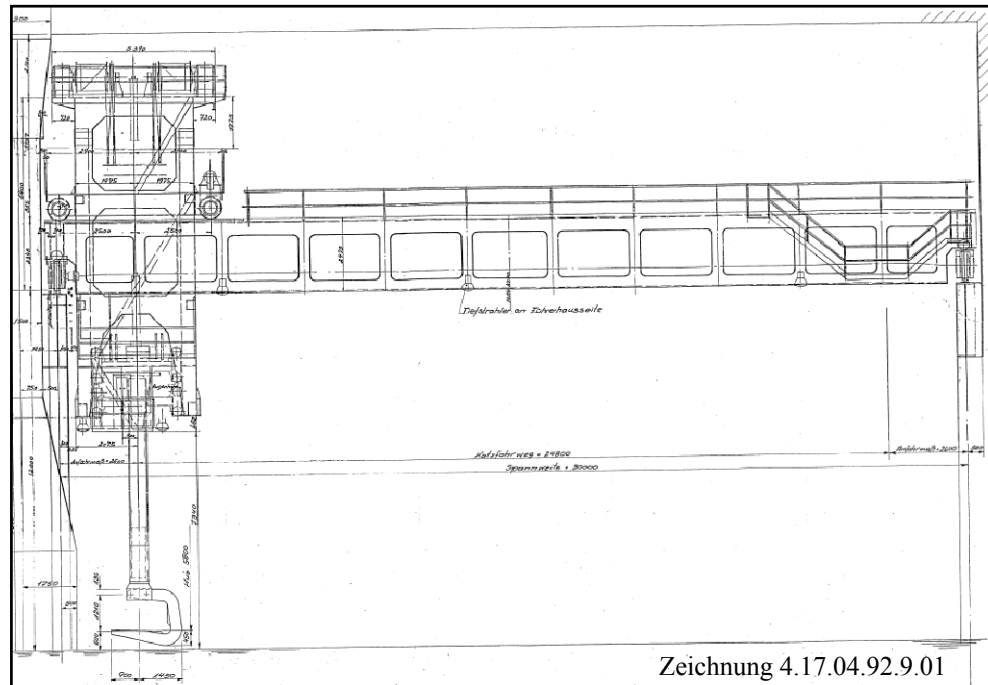


Abbildung 3: Dispositionszeichnung des Kran (Vorderansicht)

Tabelle 1: Technische Angaben Kran 7; [10]

Hersteller	MFD: Maschinen Fabrik Deutschland Aktiengesellschaft Dortmund
Baujahr	1963
Typ	Dornkran ¹
Krangruppe	III nach DIN 120 ²
Gewicht Kran / Gewicht Katze	141t / 90t
Art des Krans	Zweiträgerbrückenkran
Kranfahrwerksystem	WFF ³
Tragfähigkeit Hub 1 / Hub 2	32,0t / 10,0t
Hubhöhe	6,5m
Spannweite Kran	30m
Spannweite Katze	5,7m
Geschwindigkeit Hub 1	15,9m/min
Geschwindigkeit Hub 2	10m/min
Geschwindigkeit Katze	55m/min
Geschwindigkeit Kran	123m/min

¹ Lastaufnahmemittel ist eine Dornpratze (C-Haken)

² entspricht Hubklasse H3 und Beanspruchungsgruppe B5 (DIN 15018)

³ Zentralantrieb (DIN 15018)

2.3 Einstufung

Zur Bauzeit des Krans (1963) galt noch die DIN 120, in der Krane in Krangruppen (I-IV) eingeteilt wurden. Nach Einführung der DIN 15018 werden Krane in Hubklassen (H1-H4) und Beanspruchungsgruppen (B1-B6) eingestuft.

Der Hersteller gibt die Krangruppe III an (Tabelle 1). Bezogen auf die DIN 15018 entspricht dies der Hubklasse H3 und der Beanspruchungsgruppe B5.

Da keine komplette Rückverfolgung über die gesamte Zeitspanne vorliegt und der Kran mehrmals umgebaut wurde, werden die folgenden Annahmen zur Bestimmung der Lastspielzahl eher konservativ durchgeführt:

Im Schnitt verlassen heute 450 Coils pro Tag den Haspel. Es wird angenommen, dass jedes Coil mindestens zweimal angehoben wird. Einmal von der Coil-Bundstation zum Lagerplatz und ein zweites mal zur gewünschten Transportroute. Daraus ergeben sich 900 Hübe am Tag. Aufgerundet auf 1000 Hübe ergeben sich 365 000 Hübe pro Jahr. Das durchschnittliche Gewicht eines Coils liegt bei ca. 25t. Für die Berechnung wird das Maximalgewicht von 32t verwendet.

Die Oberwerte und Unterwerte der Beanspruchungen werden in jedem Zyklus als konstant angenommen, d.h. der Kran hebt immer die maximal zulässige Last von 32t. Damit entspricht die Belastung einer Einstufenbelastung (Abbildung 4).

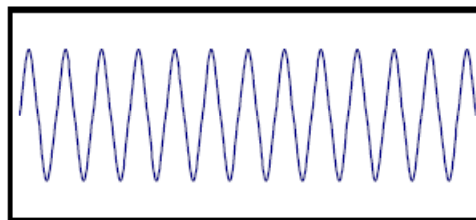


Abbildung 4: Einstufenbelastung [15]

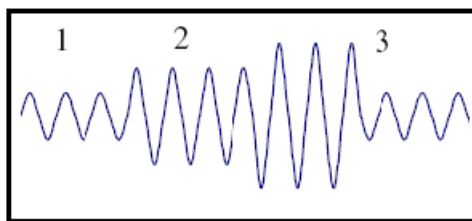


Abbildung 5: Mehrstufenbelastung [15]

Betrachtet man nun die Schwingspielzahlen des Krans für die bisherige Nutzungsdauer von 47 Jahren (1963 bis 2009) ergeben sich ca. $2 \cdot 10^7$ Schwingspiele. Für die Restnutzungsdauer werden für die Berechnung 4 Jahre angesetzt, womit eine Schwingspielzahl von ca. $2 \cdot 10^6$ erreicht wird.

3 Schadensfeststellungen

Nach Wartungsgängen und der regelmäßigen Kranprüfung wurden mehrere Schadensmeldungen am Kran 7 aufgenommen. Es handelt sich dabei überwiegend um Risse in Blechkonstruktionen. In der Abbildung 6 ist die Lage von zwei Schadensfeststellungen an der Katzkonstruktion dargestellt.

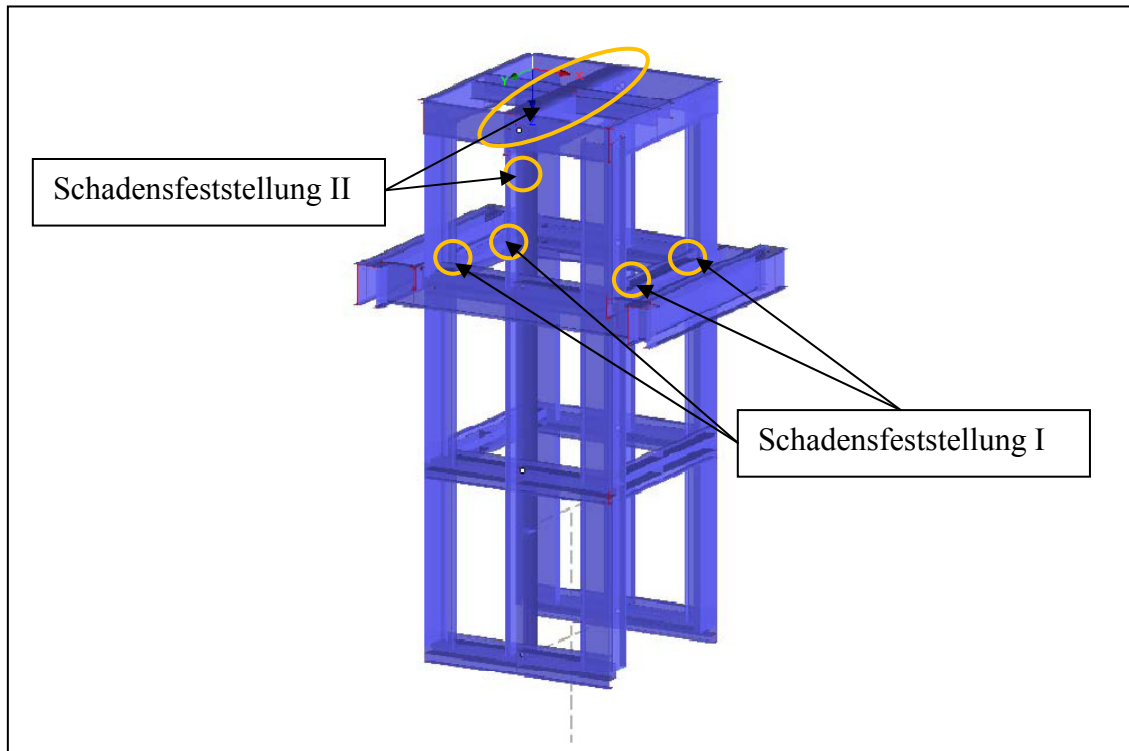


Abbildung 6: Überblick über die Positionen der Schadensfeststellungen I+II

3.1 Schadensfeststellung I

Während eines Wartungsganges wurde im Bereich der Anbindung von Katzrahmen und Schachtgerüst eine Rissbildung in einer Reparaturschweißnaht entdeckt. Aufgrund fehlender Aufzeichnungen über diese Reparaturmaßnahme existieren keine konkreten Angaben über die Nahtvorbereitung, das Schweißverfahren und den Zusatzwerkstoff. Daraufhin wurde in regelmäßigen Abständen die Rissausbreitung kontrolliert. Ein Abbohren des Risses verhinderte eine weitere Ausbreitung.

In nachfolgenden Wartungsgängen wurden im Katzrahmen drei weitere Rissbildungen festgestellt.

Der jeweils beschädigte Querschnitt ist ein Walzprofil (U-400 DIN 1026) mit einer Höhe von 400mm und einer Stegdicke von 14mm. Die Gurte haben eine Steigung von 5% und eine mittlere Stärke von 18mm.

Besonders anzumerken ist die annähernd gleiche Position der Risse. Sie befinden sich im Untergurt sowie im Stegblech des Querschnittes und haben alle einen ähnlichen Randabstand zum jeweiligen Profilende. Die Risstiefe entspricht an allen Stellen der Materialstärke des Grundwerkstoffes. Unterschiede sind nur in der Rissausbreitung zu vermerken. Der längste Riss misst ca. 220mm, das heißt über die Hälfte der Profilhöhe. Laut Stückliste handelt es sich beim Werkstoff um einen St-37. Diese Werkstoffbezeichnung stammt noch aus der alten DIN 17100-2. Nach der Norm DIN EN 10025 entspricht dies dem S235JR.

Um die weitere Betrachtung einfacher zu gestalten, wurde jedem Riss eine Positionsnummer vergeben, Position 1,2,3 und 4. Eine Draufsicht des Katzrahmens mit der Lage der jeweiligen Positionen ist in Abbildung 7 dargestellt.

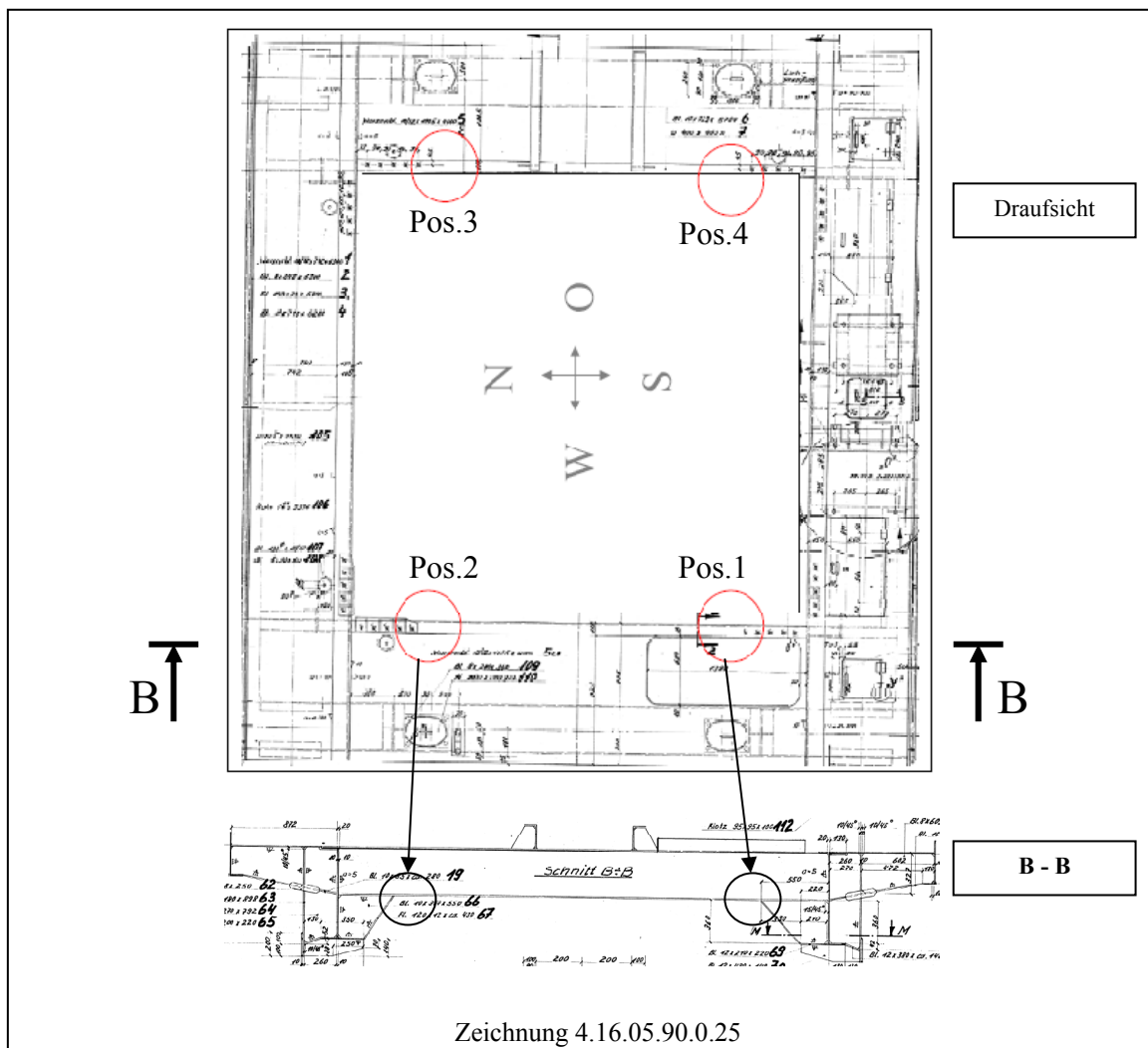


Abbildung 7: Übersicht der Risspositionen am Katzrahmen; Pos.1 bis Pos.4

Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Risse am Katzrahmenträger vor Ort. Position 1 ist die Stelle, die reparaturgeschweißt wurde und erneut gerissen war.



Abbildung 8: Pos. 1

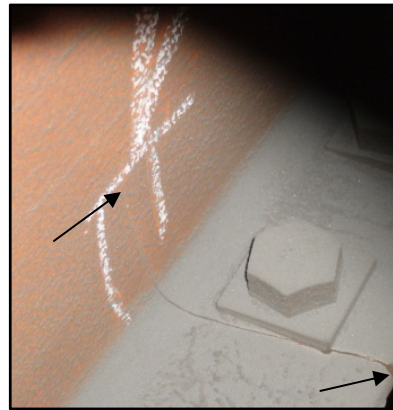


Abbildung 9: Pos. 2



Abbildung 10: Pos. 3

3.1.1 Rissursachen der Schadensfeststellung I

3.1.1.1 Rissursache der Position 1

Aufgrund fehlender Informationen über den Schweißprozess der ausgeführten Reparaturaht, wird nach Sichtung der Naht und zusätzlicher Absprache mit dem Kranbetrieb das Lichtbogenhandschweißverfahren mit basischen Elektroden als angewandtes Verfahren festgelegt.

Eine mögliche Rissursache bei diesem Verfahren ist der Kaltriss. Dieser kann durch Schweißeletroden, die nicht ordnungsgemäß rückgetrocknet wurden und durch verunreinigte Oberflächen entstanden sein. Der Wasserstoff gelangt dadurch in das Schweißgut, wo er im Lichtbogen in Wasserstoffatome dissoziiert und sich an Fehlstellen ansammelt. Die Gitterstruktur wird dabei verzerrt, es treten Spannungen auf und auf dieser Grundlage können sich Risse ausbilden. Wasserstoffrisse entstehen nicht sofort, sondern mit zeitlicher Verzögerung. Dies können Tage oder auch Wochen sein. Sie sind somit nicht immer unmittelbar nach dem Schweißen erkennbar. [11]

Eine Betrachtung des Bruchbildes ergab jedoch, dass der Riss nicht tief genug ausgefugt war, für die Schweißung keine entsprechende Nahtvorbereitung durchgeführt und darüber hinaus keine Schweißbadsicherung verwendet wurde. Somit konnten Fehlstellen im Wurzelbereich nicht ausgeschlossen werden und die Naht riss unter Belastung, beginnend von der Wurzel an.

Anhand Abbildung 11 und Abbildung 12 ist zu erkennen, dass keine Nahtvorbereitung durchgeführt sowie keine Schweißbadsicherung verwendet wurde. Die Kaltrissbildung wird demnach als Hauptursache ausgeschlossen.

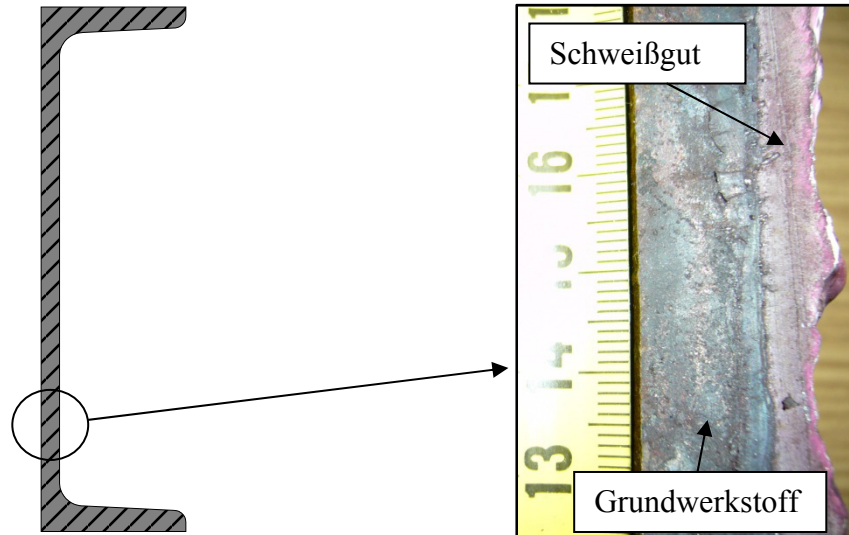


Abbildung 11: Position der Bruchstelle

Abbildung 12: Ansicht der Bruchstelle

3.1.1.2 Rissursache der Positionen 2 bis 4

Die Grundursache aller vier Risserscheinungen liegt voraussichtlich im Erreichen des Ermüdungswiderstandes an besagten Querschnittsstellen. Mit Ermüdung ist die Schädigung gemeint, die durch Risseinleitung und Rissausbreitung durch dynamische Beanspruchung hervorgerufen wird. Hierbei reichen je nach Lastkollektiv schon geringe Spannungen aus, die über einen bestimmten Zeitraum wechselnd oder schwelend auftreten.

Ermüdungsfördernde Faktoren für diese Schadensfeststellung sind unter anderem durch Kerbfälle, konstruktive Gegebenheiten und durch Temperatureinflüsse in der Halle zu begründen. Kerbfälle, wie zum Beispiel die Bohrungen im U-Profil, ergeben Spannungsspitzen, die unter Belastung des Bauteils an den Kerben entstehen und zu einer Rissbildung führen können. Die Temperaturunterschiede in der Halle können im Extremfall bis zu 65 Kelvin betragen. Sie liegen bei 0° bis 65°C. Bei den höheren Temperaturen verliert der Stahl nicht nur an statischer Festigkeit, sondern auch die Ermüdungsfestigkeit wird herabgesetzt. Die tieferen Temperaturen haben keine nachteilige Wirkung auf die Ermüdungsfestigkeit, so lange eine schlagartige Beanspruchung ausgeschlossen werden kann.

3.1.2 Werkstoffuntersuchung

Aufgrund der festgestellten Risserscheinungen im Katzrahmen des Kran 7, siehe Schadensfeststellung I, wurde eine Werkstoffuntersuchung durchgeführt mit dem Ziel, die Zusammensetzung des Stahls sowie einen Überblick über die unerwünschten Stahlbegleiter (Phosphor, Schwefel und Stickstoff) zu bekommen. Darüber hinaus sollte herausgefunden werden, ob die vorhandene Werstoffzusammensetzung als mögliche Ursache in Betracht kommen würde.

Laut den Stücklistenangaben handelt es sich beim Werkstoff um den allgemeinen Baustahl St37-2 (Bezeichnung nach DIN 17100-2). Nach heutiger Bezeichnung (DIN EN 10025) entspricht dies dem S235JR. Entschlüsselt man die aktuelle Bezeichnung, erhält man folgende Angaben:

Der Stahl hat eine Mindeststreckgrenze von 235N/mm² und eine Kerbschlagarbeit von 27J bei einer Prüftemperatur von 20°C (Raumtemperatur). Hinter JR folgt keine Angabe zum Desoxidationsgrad. Das bedeutet, der Auslieferungszustand ist freigestellt.

Für die o.g. Werkstoffuntersuchung wurde eine Probe aus dem gewalzten U-Profil entnommen (Abbildung 13) und zur Salzgitter Mannesmann Forschung geschickt. Diese führten eine chemische Analyse der Werkstoffprobe (Tabelle 2) aus und legten einen Mikroschliff an.

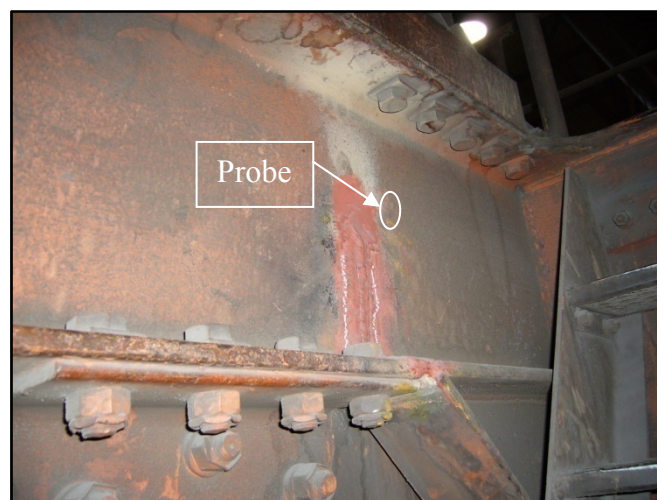


Abbildung 13: Position der Probenentnahme am Katzrahmen

Tabelle 2: Auswertung der chemischen Analyse [22]

Bezeichnung	Desoxidationsgrad	C in % für t ≤ 16mm	Si	Mn	P	S	N	Cu
S235 JR	FN	0,17	-	1,4	0,035	0,035	0,012	0,55
St37-2	-	0,103	0,22	0,385	0,01	0,035	-	0,149

Legende:

max. Werte n. DIN EN 10025-2

Ist-Werte nach chem. Analyse

Es wurde ein Mikroschliff der Probe angefertigt, um einen Einblick in das Gefüge zu bekommen. Anhand der Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 ist deutlich zu erkennen, dass die Probe von zeilenförmigen Mangansulfiden durchzogen ist (siehe Pfeilmarkierungen). Unlegierte Stähle können bis zu 1,6% Mangan (Mn) enthalten. Dieser verbindet sich mit dem Stahlbegleiter Schwefel (S) zu den o.g. Mangansulfiden (MnS).

Die chemische Analyse ergab einen Schwefelgehalt von 0,035%. Beim Walzvorgang werden die Mangansulfide gestreckt und liegen zeilenförmig im Gefüge vor (Abbildung 15). Mangansulfide gelten in der Regel für den Werkstoff als ungefährlich, solange keine Beanspruchung quer zur Walzrichtung vorliegt. Ansonsten würden sie die Zähigkeitseigenschaften in Dickenrichtung negativ beeinflussen.

Zusammengefasst lässt sich jedoch sagen, dass der Werkstoff nicht die Grundursache für die Risserscheinungen am

Katzrahmen ist, da das Bauteil keiner Beanspruchung in Dickenrichtung ausgesetzt ist.

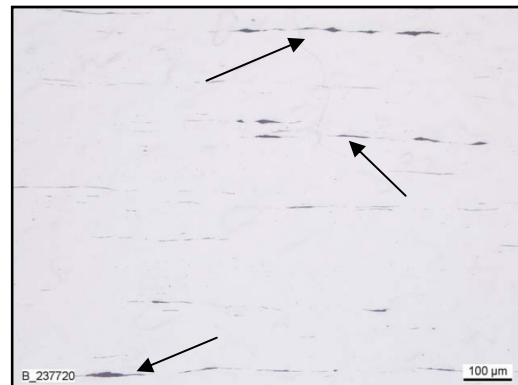
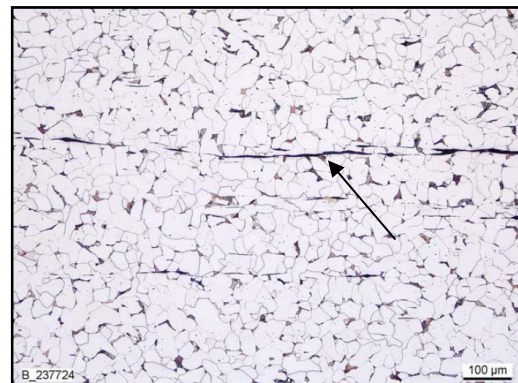
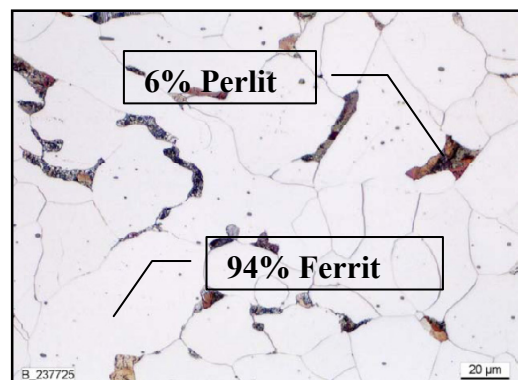


Abbildung 14: Schliff ungeätzt; 100:1, [21]

Abbildung 15: Schliff geätzt HNO₃; 100:1, [21]Abbildung 16: geätzt HNO₃; 500:1; KG:7, [21]

3.2 Schadensfeststellung II

Diese Beschädigung bezieht sich auf das obere Katzgerüst der Laufkatze mit Schwerpunkt auf den Mittelträger. Dieser besteht unter anderem aus einem geschweißten Kastenquerschnitt mit 8mm starken Stegblechen und 15mm starken Gurtblechen (Abbildung 17).

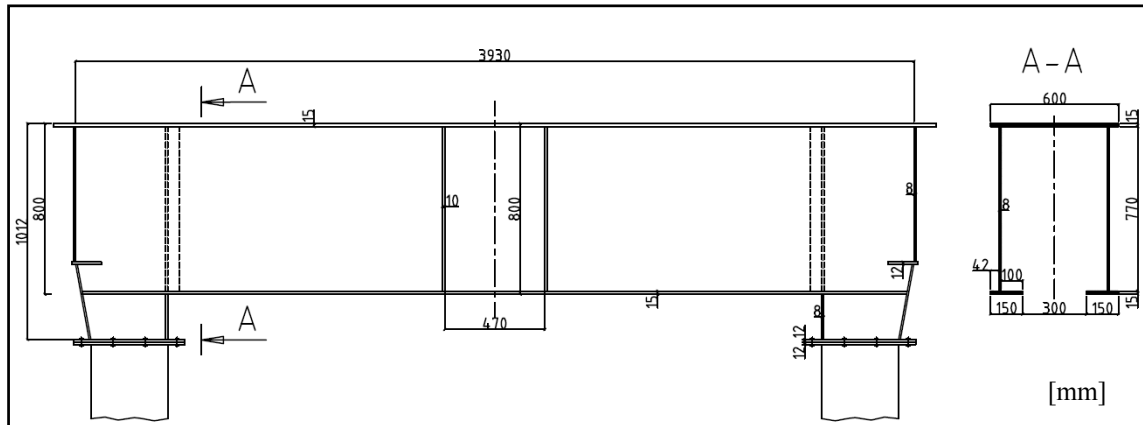


Abbildung 17: Ansicht Mittelträger (QS9)

3.2.1 Schadensursache und Folgen der Schadensfeststellung II

Die Ursache war ein Ausfall des Endsaltersystems des Hubwerkes. Es erfolgte keine Abschaltung beim Anfahren der Endanschläge, wodurch der Kran weiter im Kontakt „Heben“ blieb und ungebremst in die oberen Puffer fuhr. Aufgrund der großen Drehmomente der Hubwerksmotoren und der Anprallsituation wurden die Pufferkonsolen in die Mittelträgerkonstruktion gedrückt (Abbildung 18). Da die Höhenbegrenzung außer Kraft gesetzt war, schlugen die Seilscheiben ebenfalls in die Tragkonstruktion und es kam zu erheblichen plastischen Verformungen mit teilweisen Einrissen (Abbildung 19 und Abbildung 20). Die Stützen des Mittelträgers sowie deren Montagestöße (Kopfplattenverbindung) weisen auch starke Beschädigungen auf. Die Kopfplatten wurden stellenweise über 45° nach oben gebogen. Die Passschrauben der Größe M24 wurden teilweise abgerissen. Dadurch ist kein Kontakt der Montagestöße mehr gegeben, stellenweise existieren klaffende Fugen 10mm. (Abbildung 21).

3.2.2 Schadensbilder des oberen Katzgerüsts

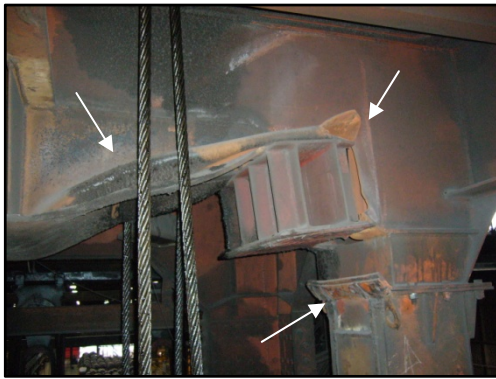


Abbildung 18: Ansicht Süd-West-Seite

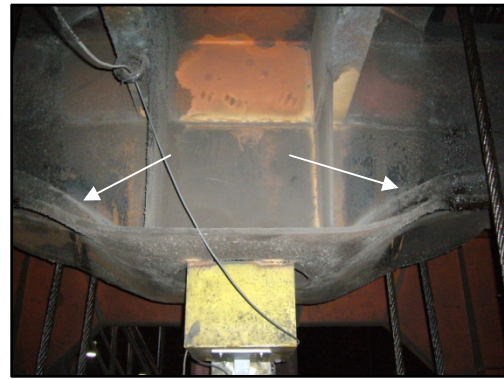


Abbildung 19: Ansicht West-Seite

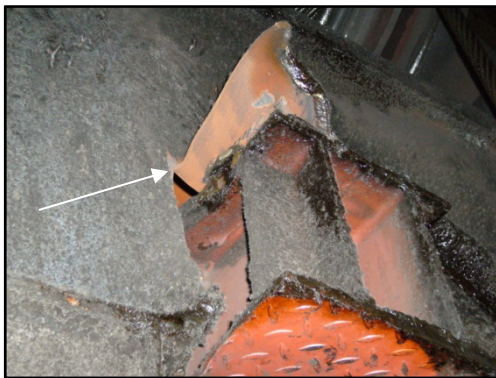


Abbildung 20: Ansicht Süd-Ost-Seite

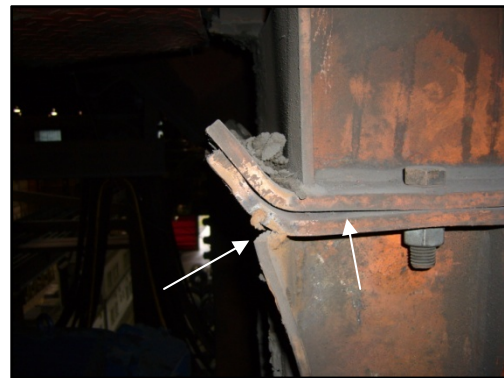


Abbildung 21: Ansicht Süd-West-Seite

3.2.3 Endschalersystem des Hubwerkes

Das Endschalersystem sorgt für eine Abschaltung des Hubantriebes bei Erreichen der maximal eingestellten Hubhöhe. Nachfolgend werden zwei Systeme kurz erläutert.

3.2.3.1 Endschalersystem I

Der bisherige Stand für die Abschaltung des Hubwerkes besteht aus mechanischen Schaltern. Sie werden mittels eines sogenannten Endschalterlineals betätigt, welches sich auf der oberen Traverse befindet (Abbildung 22). Aufgrund der mit der Zeit gestiegenen Toleranzen, treten vermehrt Schwingungen auf, die über das starre Endschalterlineal auf die Endschalter übertragen werden. Diese Schwingungen führten zum Versagen der Schalter und somit zur Havarie im Katzgerüst.

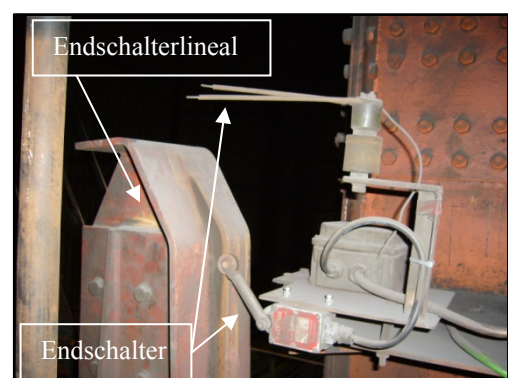


Abbildung 22: Endschalter Hubwerk

3.2.3.2 Endschalersystem II

Mit dem Einsatz eines Getriebe-Nocken-Endschalters (Kopierwerk) wird eine höhere Sicherheit und Zuverlässigkeit bzgl. der Endabschaltung des Hubwerkes erreicht.

Das Prinzip des Systems besteht darin, Umdrehungen der Seiltrommel auf dem Drehwinkel der eingebauten Nockenwelle abzubilden. Die einzelnen Nocken betätigen mechanische Schaltkontakte, die für die Endabschaltung des Hubwerkes sorgen [24].

Der Getriebeendschalter sitzt direkt an der Seiltrommelachse (Abbildung 23) und ist somit nicht den Schwingungen ausgesetzt, die zuvor beim alten System (Punkt 3.2.3.1) erwähnt worden.

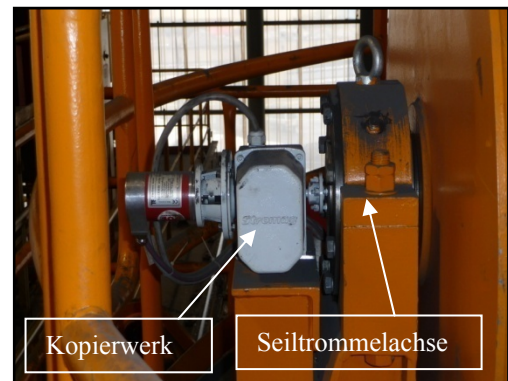


Abbildung 23: montiertes Kopierwerk an Seiltrommel

4 Allgemeiner Berechnungsteil

Aufgrund der Schadensfeststellungen ist es notwendig, Bereiche der Laufkatze rechnerisch zu untersuchen. Ziel ist ein Überblick über die vorhandenen Nennspannungen zu erhalten, anhand derer eine Aussage über den Beanspruchungsgrad sowie eine Aussage über den Ermüdungszustand des zu untersuchenden Bereiches getroffen werden kann.

Die zu untersuchenden Bereiche sind zum einen der Teil des Katzrahmens, bei dem Risse festgestellt wurden (Schadensanalyse I) und zum anderen der Bereich des oberen Katzgerüsts, der bei einer Havarie beschädigt wurde (Schadensanalyse II).

Der Kran wurde in den 60er Jahren konstruiert, gerechnet und gefertigt. In dieser Zeit galt die Krannorm DIN 120.

1974 wurde sie von der DIN 15018 abgelöst, diese besitzt bis heute noch Gültigkeit.

Seit 2005 existiert parallel zur DIN 15018 eine neue Krannorm, die DIN EN 13001.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die rechnerische Untersuchung des Katzrahmens auf zwei verschiedenen Arten durchgeführt: Einmal nach der bekannten Norm DIN 15018, die auf dem System der zulässigen Spannungen basiert, und einmal nach der neueren Norm DIN 13001-2, mit dem System der Grenzzustände.

4.1 Beschreibung der Laufkatze

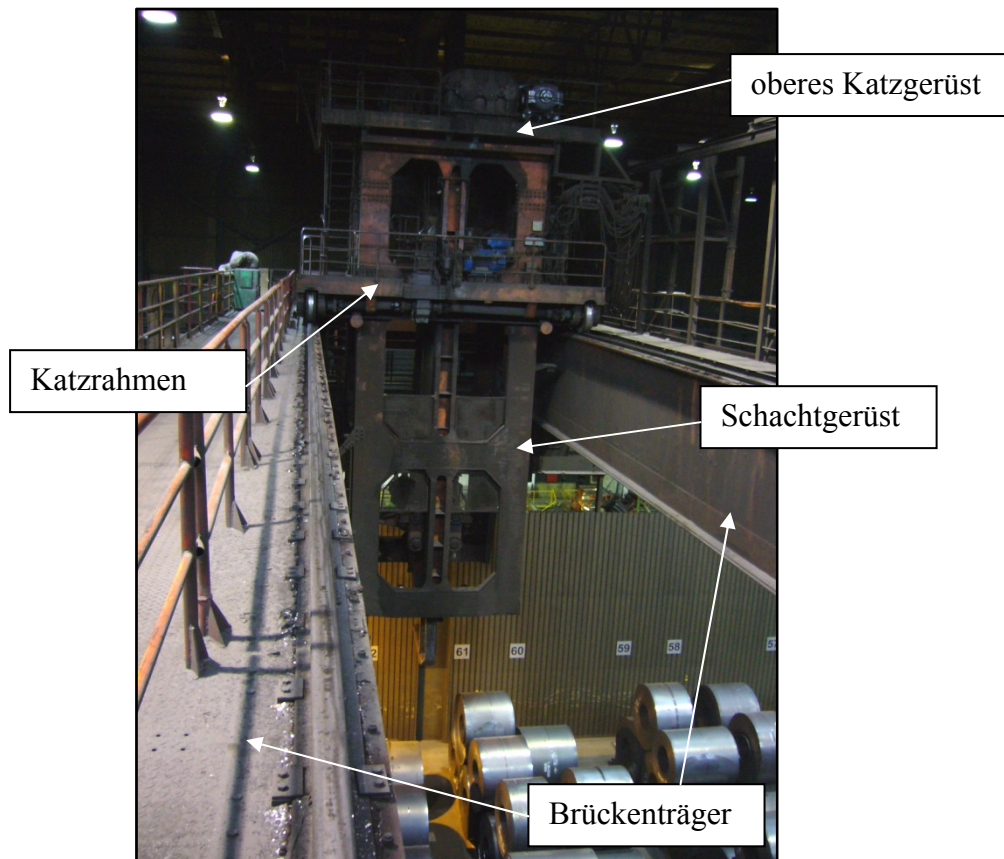


Abbildung 24: Zweischienenlaufkatze des Kran 7

Die Zweischienen-Laufkatze gehört zu einem Zweiträgerbrückenkran, der für den Lagertransport von Coils mit einem maximalen Gewicht von 32t eingesetzt wird. Die Katze besitzt eine sogenannte starre Lastführung, die aus einem Schachtgerüst mit zwei Führungstraversen und einem geführten Baum (Dornsäule) besteht. An diesem Baum befindet sich das Lastaufnahmemittel, eine sogenannte Dornpratze. Der Krantyp wird auch als Dornkran bezeichnet. Bei dieser Art der Lastführung existiert so gut wie kein Pendeln der Last, wie z.B. bei einem Flaschenkran (Abbildung 25). Dadurch ist ein schnelles und exaktes Positionieren der Last möglich, da keine Pendelausgleichszeit anfällt.

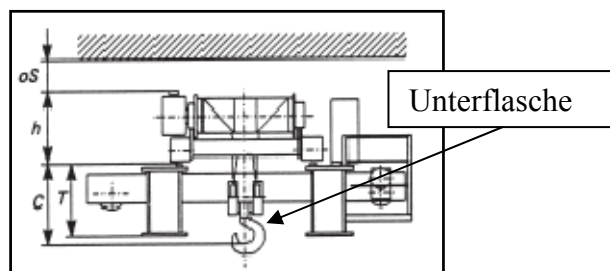


Abbildung 25: Beispiel eines Flaschenkrans [25]

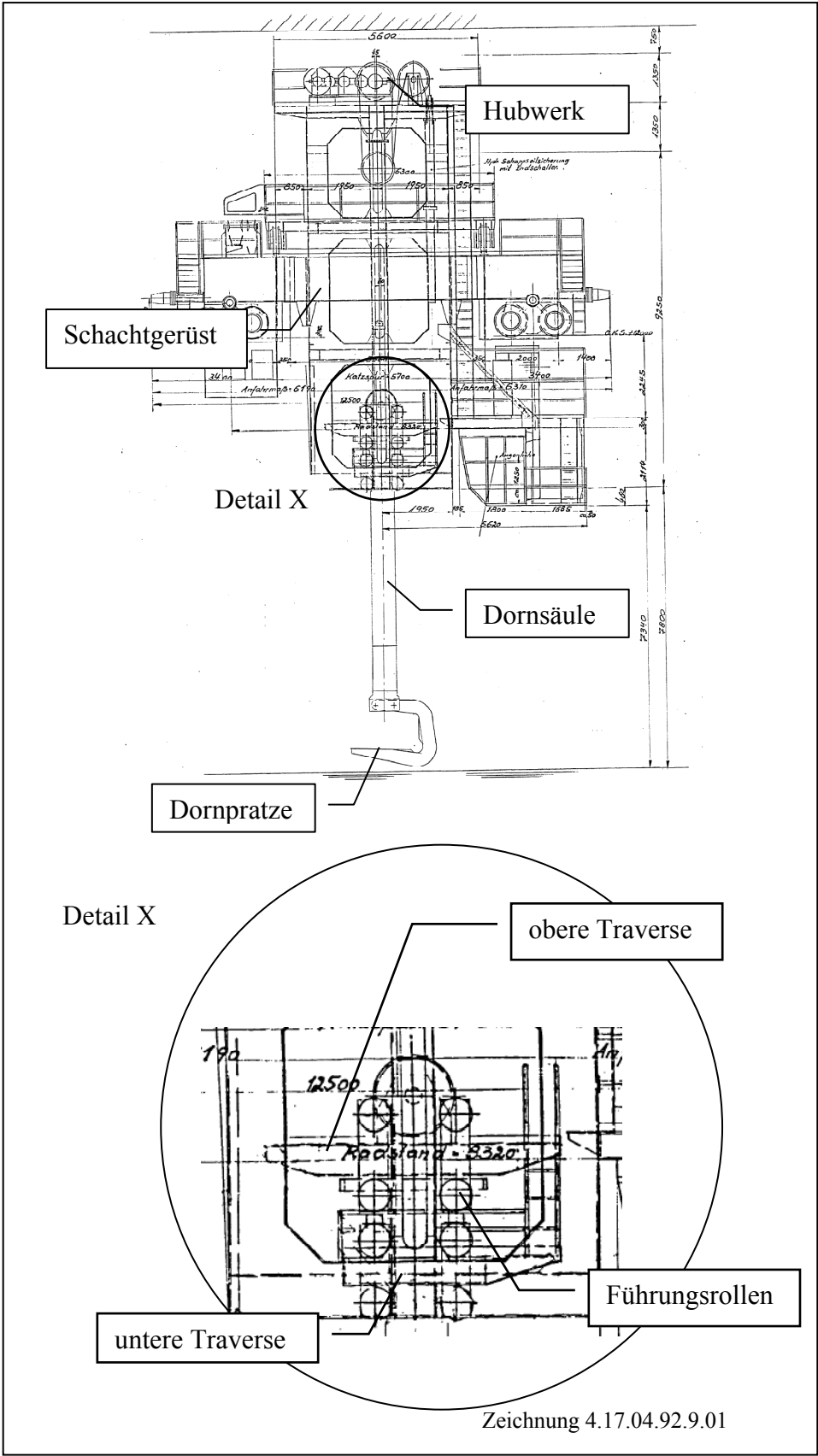


Abbildung 26: Ansicht der Laufkatze mit Detailansicht auf die beiden Traversen

4.2 Zeichnungen

Angaben für die Berechnungen wurden aus folgenden Zeichnungen entnommen.

Tabelle 3: technische Zeichnungen Kran 7; (siehe digitaler Anhang)

Zng. Nr. SZST	Bezeichnung
4.16.05.90.0.25 a	Fahrkatze
4.16.05.90.0.26 a	Schachtgerüst I
4.16.05.90.0.27	Schachtgerüst II
4.16.05.90.0.30	Stückliste Fahrkatze
4.16.05.90.0.31	oberes Katzgerüst
4.16.05.90.0.32	Schnitte zum ob. Katzgerüst
4.16.05.90.0.36	Stückliste Katzgerüst
4.16.05.90.0.37	Treppen + Geländer
4.16.05.90.0.66	Verstärkung ob. Katzgerüst
4.16.05.90.0.67	Unterzug Hubwerksbremse
4.16.05.90.5.30/1 f	Untere Traverse Blatt 1/2
4.16.05.90.5.30/2 a	Untere Traverse Blatt 2/2
4.16.05.90.5.30	Stückliste Untere Traverse
4.16.05.90.5.47	Änderung obere Traverse
4.16.05.90.9.01	Übersicht und Ausbau Zangenkran
4.16.05.90.9.03 c	Schnitte und Zusammenstellung
4.16.05.90.9.04	Hilfshub
4.16.05.90.9.07	Sperrbereichsendschaltung
4.16.05.90.9.08	Zusammenstellung „D1“

4.3 Werkstoff

Für alle tragenden Stäbe wird der Werkstoff St37-2 bzw. S235JR angesetzt.

4.4 Einstufung und Arbeitsgeschwindigkeiten

Hubgeschwindigkeit:	15,9m/min
Katzfahrgeschwindigkeit:	55m/min
Kranfahrgeschwindigkeit:	123m/min
Katzfahrbeschleunigung:	0,17m/s ²

Kranfahrbeschleunigung:	0,26m/s ²
Hubklasse:	H3
Beanspruchungsgruppe:	B5
Eigenlastbeiwert φ :	1,1
Hublastbeiwert ψ :	1,4

4.5 Berechnungsmodell

Die Katze mit Katzrahmen und Schachtgerüst wird mit Hilfe des Stabwerkprogrammes RSTAB als räumliches Tragwerk modelliert.

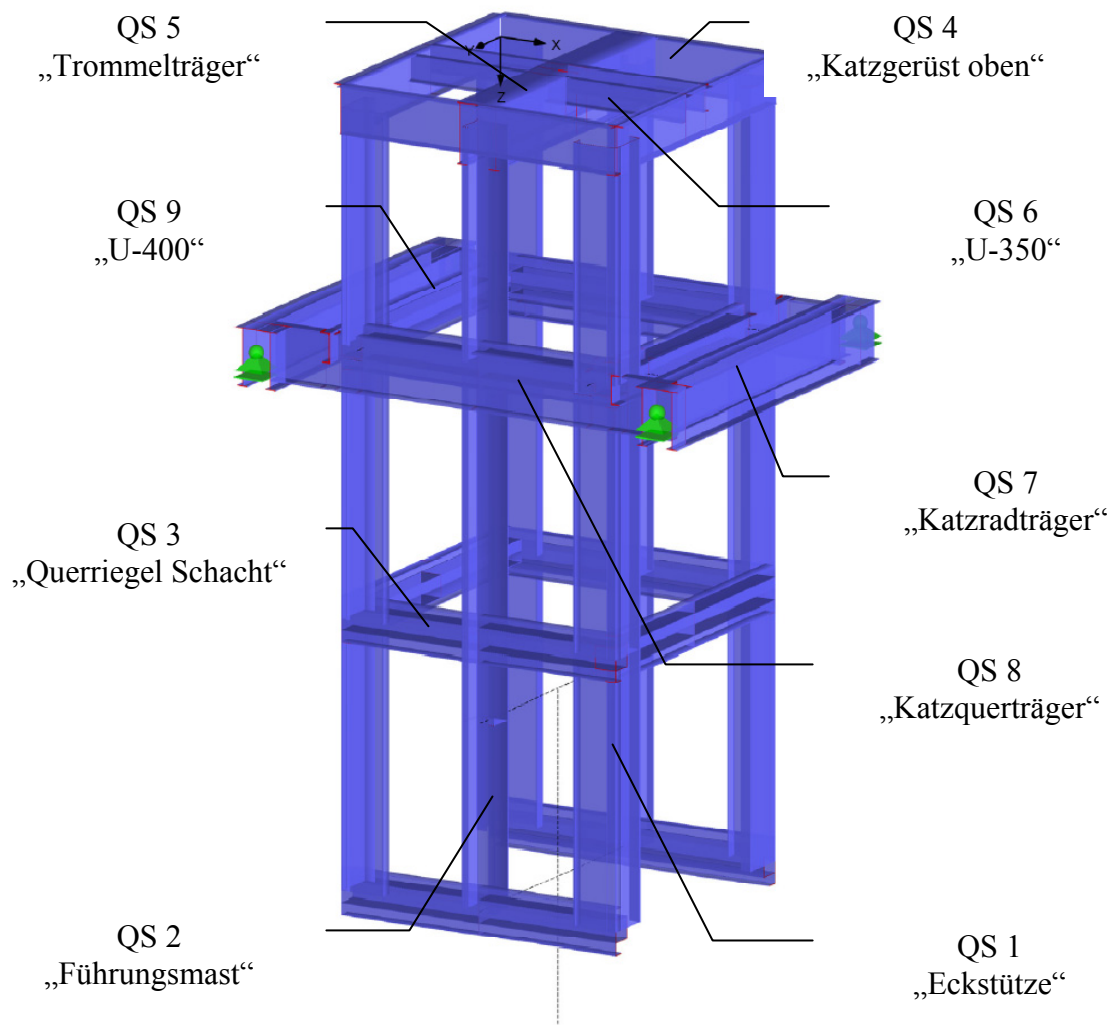


Abbildung 27: RSTAB-3D-Modell der Laufkatze mit den Querschnitten 1bis 9

4.6 Querschnitte

Damit das komplexe Tragwerk der Laufkatze in ein Berechnungsprogramm umgesetzt werden kann, werden Ersatzquerschnitte bestimmt, mit denen sich das Tragwerk simulieren lässt. Dabei handelt es sich um geschweißte Blechträger oder Walzprofile. Die Querschnittabmessungen werden anhand der unter Abschnitt 4.2 aufgeführten Zeichnungen entnommen. Die Querschnitte werden idealisiert, indem Querschnittsverminderungen angesetzt werden. Mit dieser konservativen Einstellung geht man kein Risiko ein.

Die Berechnungen der Querschnittsgrößen QS1 bis QS9 sind im Anhang C abgelegt. Dort wird jeweils der Querschnitt mit seinen Abmessungen und Querschnittswerten dargestellt.

4.7 Struktur des Berechnungsmodells (RSTAB)

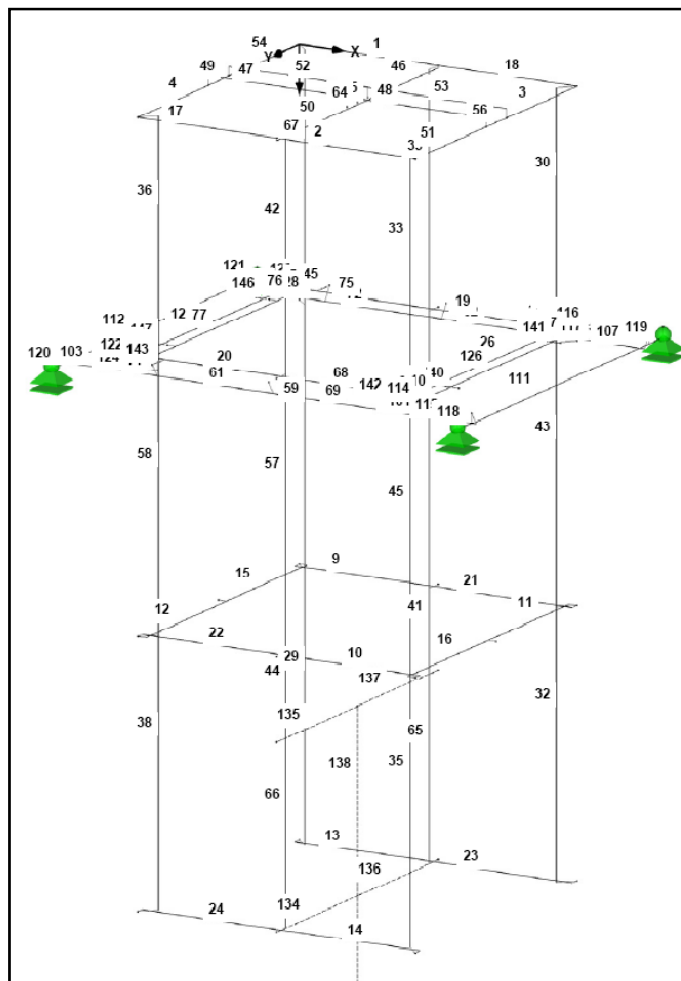


Abbildung 28: Strukturmodell der Laufkatze im RSTAB Modul

Mit Hilfe des Stabwerksprogramm RSTAB von der Firma Dlubal wird der komplexe Katzaufbau als Stabwerk umgesetzt. Die Stäbe sind zunächst den Schwereachsen der idealisierten Querschnitte angepasst.

In einem weiteren Schritt werden Exzentrizitäten für bestimmte Stäbe berücksichtigt, um den Katzaufbau möglichst real abzubilden.

Die Abmaße wurden aus den technischen Zeichnungen des Krans (Abschnitt 4.2) entnommen und im Stabwerksprogramm eingegeben.

Alle tragenden Querschnitte werden als Balkenstäbe ausgebildet. Beim Verbinden von Balkenstäben liegt am Verbindungsknoten immer ein biegesteifer Anschluss vor. Sie können durch alle Lastarten beansprucht werden.

Für die vier Eckverbindungen des Schachtgerüsts mit dem Katzrahmen werden keine Balkenstäbe eingesetzt, sondern sogenannte Kopplungsstäbe. Es handelt sich dabei um virtuelle Stäbe mit definierbaren starren oder gelenkigen Eigenschaften. Die Normal- und Querkräfte bzw. Torsions- und Biegemomente werden direkt von Knoten zu Knoten übertragen. Mit Hilfe der Kopplungsstäbe sollen die biegesteifen Winkelverbindungen, welche den Katzrahmen mit dem Schachtgerüst verbinden, realisiert werden (Abbildung 29).

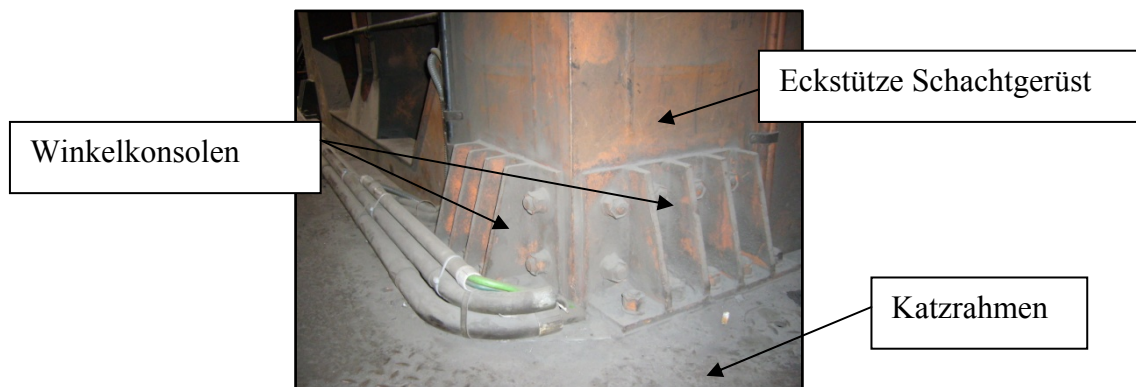


Abbildung 29: Winkelverbindungen Schachtgerüst – Katzrahmen

Die Laufräder der Katze bilden die Auflager. Sie leiten die Kräfte in den jeweiligen Brückenträger und über die Kranlaufräder in die jeweilige Kranbahn. Alle Räder sind mit Spurkränzen ausgelegt, d.h. sie verfügen über eine seitliche Führung. Angetrieben werden zwei der vier Katzlaufräder über einen Mittenantrieb (Zentralantrieb), wodurch nur die Antriebsachse direkt beschleunigt oder abgebremst werden kann.

Um ein möglichst zwangsfreies Modell zu erhalten, müssen die Auflager dementsprechend modelliert werden. Ziel ist so wenig wie möglich Eigenspannungen hervorzurufen, die das Spannungsbild verfälschen würden.

Die Auswahl für das 3D Modell wird mit drei Loslagern und einem Festlager getroffen.

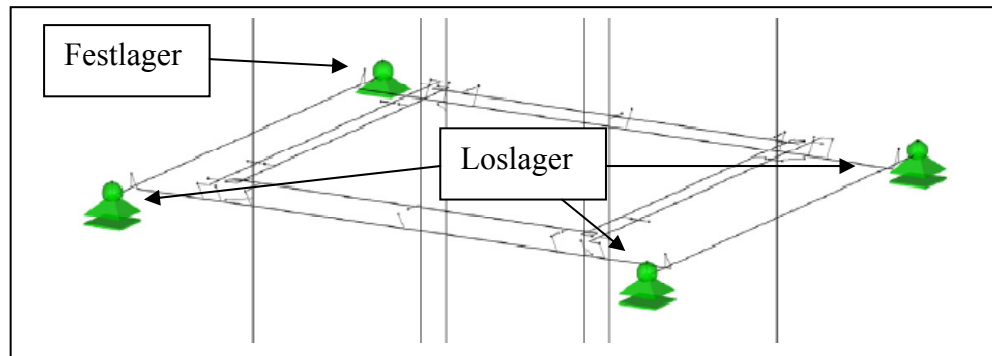


Abbildung 30: Auflagersituation des Katzrahmens

Aufgrund der starren Lastführung der Laufkatze gewinnen die Massenkräfte aus Kranfahrt und Katzfahrt bzgl. der Lastannahme an Bedeutung. Bei voll ausgefahrenem Baum, d.h. bei unterer Laststellung und gleichzeitiger Kran- und Katzfahrt wirken die resultierenden Massenkräfte auf die Katzkonstruktion. Damit dies im Stabwerkprogramm berücksichtigt wird, wurden die Dornsäule und Traversen mit Hilfe von Kopplungsstäben (fest-fest) simuliert (Abbildung 31).

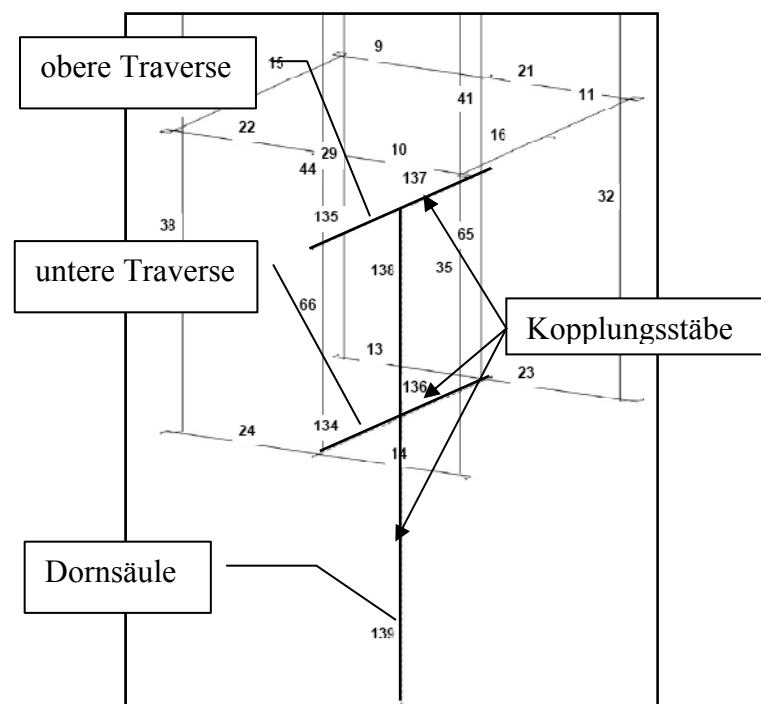


Abbildung 31: Kopplungsstäbe für Traversen und Dornsäule

5 Lastannahmen nach DIN 15018

Die auf den Kran einwirkenden Lasten sind in drei Gruppen unterteilt: Hauptlasten, Zusatzlasten und Sonderlasten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Einteilung der Lasten nach DIN 15018

Hauptlasten	Zusatzlasten	Sonderlasten
Eigenlasten	Windlasten	Kippkraft bei Laufkatzen mit Hublastführung
Lasten von Schüttgütern	Kräfte aus Schräglauf	
Hublasten	Wärmeeinwirkungen	Pufferkräfte
Massenkräfte aus Antrieben	Schneelasten	Prüflasten
Fliehkräfte	Lasten auf Laufstegen, Treppen und Podesten	-
Aufprall von Schüttgut		

Ein kompletter Nachweis der Katze mit Berücksichtigung der Hauptlasten, Zusatzlasten und Sonderlasten wird nicht durchgeführt, da sich der Schwerpunkt der rechnerischen Untersuchung auf die Ermüdungsfestigkeit des Katzrahmenprofils (U-400) bezieht.

5.1 Hauptlasten

Nach DIN 15018 Kapitel 7.4 ist der Betriebsfestigkeitsnachweis nur in den Lastfällen H (Hauptlasten) und für Spannungsspiele über $2 \cdot 10^4$ für Bauteile und Verbindungsmittel zu führen. Das bedeutet, die Lastannahmen der Laufkatze werden anhand der Hauptlasten betrachtet (Tabelle 4; Spalte 1).

Die „Lasten aus Schüttgütern“, „Aufprall von Schüttgut“ sowie die „Fliehkräfte“ werden nicht berücksichtigt, da es sich beim Kran 7 um keinen Auslegerkran handelt und auch kein Schüttgut transportiert wird.

5.1.1 Eigenlasten

Unter Eigenlasten fallen alle Gewichtskräfte, ob mechanisch oder elektrisch, ob fest oder beweglich. Ausnahmen bilden die Lastaufnahmemittel (z.B. Haken, Greifer, Magnet) und die Nutzlast (z.B. Coil, Bramme).

5.1.2 Hublasten

Hublasten setzen sich aus der Nutzlast sowie aus den Eigenlasten der Teile zusammen, die senkrecht bewegt werden (z.B. Traverse, Magnet usw.)

5.1.3 Massenkräfte aus Antrieben

Durch die Beschleunigungen von Katze und Kran wirken zusätzlich Massenkräfte auf das Katzgerüst. Diese werden aus den auftretenden Kräften der Antriebe ermittelt: Kranfahrt und Katzfahrt.

5.1.4 Wirkungen lotrechter Massenkräfte

Mit Hilfe von Schwingbeiwerten bzw. Lastbeiwerten werden Stoßvorgänge, die während des Kranbetriebes auftreten, berücksichtigt. Dies gilt z.B. für: Ruckartiges Abbremsen der Hublast, plötzliches Abwerfen oder Aufnehmen der Last sowie ruckartiges Beschleunigen. Es gibt zwei Schwingbeiwerte für Krane, die unter Abschnitt 5.1.4.1 und 5.1.4.2 erläutert werden.

5.1.4.1 Eigenlastbeiwert ϕ_e

Dieser Lastbeiwert berücksichtigt mögliche Tragwerksschwingungen bei horizontalen Bewegungen des Krans oder der Katze. Er ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit v_F und von der Fahrbahnbeschaffenheit und wird nach Tabelle 5 bestimmt.

Tabelle 5: Eigenlastbeiwerte ϕ [3]

Fahrgeschwindigkeit v_F in m/min		Eigenlast- beiwert ϕ_e
Fahrbahnen		
mit Schienenstößen oder Unebenheiten (Straße)	ohne Schienenstöße oder mit geschweißten, bearbeiteten Schienen- stößen	
bis 60	bis 90	1,1
über 60 bis 200	über 90 bis 300	1,2
über 200	-	$\geq 1,2$

Die Fahrgeschwindigkeit der Katze wird aus den technischen Angaben des Krans (Abschnitt 2.2) entnommen. Sie beträgt 55m/min. Die Schienenstöße in der Halle, in der der Kran eingesetzt ist, sind geschweißt und bearbeitet. Nach Tabelle 5 befindet man sich mit den genannten Parametern in der Spalte der Fahrgeschwindigkeit „bis 90 m/min“ und erhält einen Eigenlastbeiwert ϕ_e von 1,1.

5.1.4.2 Hublastbeiwert ψ

Dieser Lastbeiwert berücksichtigt die vertikalen Stöße aus Heben und Senken auf das Krantragwerk. Dies betrifft alle Teile, die beim Hubvorgang senkrecht bewegt werden. Er ist abhängig von der Hubgeschwindigkeit und lässt sich anhand Tabelle 6 bestimmen.

Tabelle 6: Hublastbeiwerte ψ [3]

Hubklasse	Hublastbeiwert ψ bei Hubgeschwindigkeit v_H in m/min	
	bis 90	über 90
H1	$1,1 + 0,0022 \cdot v_H$	1,3
H2	$1,2 + 0,0044 \cdot v_H$	1,6
H3	$1,3 + 0,0066 \cdot v_H$	1,9
H4	$1,4 + 0,0088 \cdot v_H$	2,2

Die Hubgeschwindigkeit beträgt laut Datenblatt (Abschnitt 2.2) 15,9m/min und die Hubklasse ist mit H3 angegeben. Mit der Formel aus der ersten Spalte „bis 90m/min“ und der dritten Zeile wird der Hublastbeiwert berechnet.

$$\psi = 1,3 + 0,0066 \cdot v_H$$

$$\psi = 1,3 + 0,0066 \cdot 15,9$$

$$\underline{\underline{\psi = 1,4}}$$

5.2 Bestimmung der Lastfälle nach DIN 15018

Nachdem die Lastbeiwerte bestimmt sind, werden Lastfälle aufgestellt, die später zu Lastgruppen bzw. Lastkombinationen, unter Berücksichtigung der Lastbeiwerte miteinander kombiniert werden.

Nachfolgend sind die Lastfälle LF1 bis LF 5 aufgelistet. Die Gewichtsangaben sind aus den zugehörigen Stücklisten der jeweiligen technischen Zeichnungen entnommen worden.

5.2.1 LF1 Eigenlast G

Katzrahmen:	~ 6,5t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.0.30]
oberes Katzgerüst:	~ 7t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.0.36]
Schachtgerüst	~ 15t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.0.30]
<u>Hubwerk kompl.:</u>	<u>~ 10,5t</u>	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.3.01]
Summe:	G ≈ <u>39t</u>	

5.2.2 LF2 Hublast P₀ (ohne Nutzlast)

Hierunter fallen alle fest eingesicherten Teile mit Ausnahme der Nutzlast.

obere Traverse:	~ 11,5t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.5.47]
untere Traverse:	~ 1,5t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.5.30]
Dornsäule:	~ 1,8t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.5.15]
Dornpratze:	~ 2,7t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.3.19]
<u>Nutzlast max.</u>	<u>~ 0t</u>	
Summe:	P ₀ ~ <u>17,5t</u>	

5.2.3 LF3 Hublast P

Hierunter fallen alle fest eingesicherten Teile mit Nutzlast

obere Traverse:	~ 11,5t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.5.47]
untere Traverse:	~ 1,5t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.5.30]
Dornsäule:	~ 1,8t	[siehe Stückliste: 4.16.05.90.5.15]
Dornpratze:	~ 2,7t	[siehe Stückliste: 4.16.28.90.3.19]
<u>Nutzlast max.</u>	<u>~ 32t</u>	[lt. Betreiber Warmwalzerk]
Summe:	P ~ <u>49,5t</u>	

5.2.4 LF4 Massenkräfte aus Antrieb Kranfahrt Kr

Beschleunigung aus Kranfahren:

Je Kranbrücke existiert ein Mittenantrieb mit Antriebswelle, der jeweils zwei Laufräder antreibt. Somit werden insgesamt vier der acht Laufräder angetrieben.

Die Wirkung der Massenkräfte aus der Kranfahrbewegung kann einmal über den Antrieb und einmal über den Reibschluss ermittelt werden.

a) Massenkräfte durch Beschleunigung aus Kranfahrt bzgl. des Antriebs:

Die Anlaufzeit, um aus dem Stillstand auf Nennfahrgeschwindigkeit zu gelangen, beträgt ca. 8 Sekunden. Dies entspricht einer mittleren Beschleunigung von $a_{Kran} = 0,26 \text{ m/s}^2$:

$$\boxed{a_{Kran} = \frac{v_{Kran}}{t_{Anlauf}}} \quad \begin{array}{l} v_{Kran} = 123 \text{ m/min} \\ t_{Anlauf} = 8 \text{ sec} \end{array} \quad a_{Kran} = \frac{123 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{8 \text{ sec} \cdot 60} = \underline{\underline{0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

Die Antriebskraft $F_{Antrieb}$ setzt sich aus der Summe der Massen von Kran, Katze und Nutzlast und der Beschleunigung a_{Kran} zusammen:

$$\boxed{F_{Antrieb} = (m_{Kran} + m_{Kabine} + m_{Katze*} + m_{Nutzlast}) \cdot a}$$

$$F_{Antrieb} = (141t + 6t + 62t + 32t) \cdot 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{Antrieb} = 241t \cdot 0,26 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \underline{\underline{62,66 \text{ kN}}}$$

b) Massenkräfte durch Beschleunigung aus Kranfahrt bzgl. des Reibchlusses:

Nach DIN 15018-1 Kapitel 4.15 ist die kleinste Radlastsumme der angetriebenen Laufräder maßgebend:

$$\min \sum R_{Kr} = 0,5 \cdot (141t + 6t + 62t) = 1045 \text{ kN}$$

Die Summe der Reibkräfte ergibt sich durch Multiplikation mit dem Reibkoeffizienten $\mu_{\text{Stahl}} = 0,2$:

$$\boxed{F_{\text{Reibung}} = 0,2 \cdot \min \sum R_{Kr}}$$

$$F_{\text{Reibung}} = 0,2 \cdot 1045 \text{ kN}$$

$$F_{\text{Reibung}} = \underline{\underline{209 \text{ kN}}}$$

Vergleich der Massenkkräfte aus a) und b):

$$F_{\text{Antrieb}} = \underline{\underline{62,66 \text{ kN}}} < 209 \text{ kN} = F_{\text{Reibung}}$$

Daraus folgt, die Massenkkräfte durch die Beschleunigung aus der Kranfahrt sind anhand des Antriebes zu bestimmen.

Anhand Abbildung 32 werden die Schwerpunktlagen der Katze bei unterschiedlicher Laststellung aufgeführt.

- a) Katze ohne Hublast ca. 1000mm über Oberkante Katzschiene
- b) Nutzlast in unterer Stellung ca. 11000mm unter Oberkante Katzschiene
- c) Hublast in oberer Stellung ca. 5500 mm unter Oberkante Katzschiene

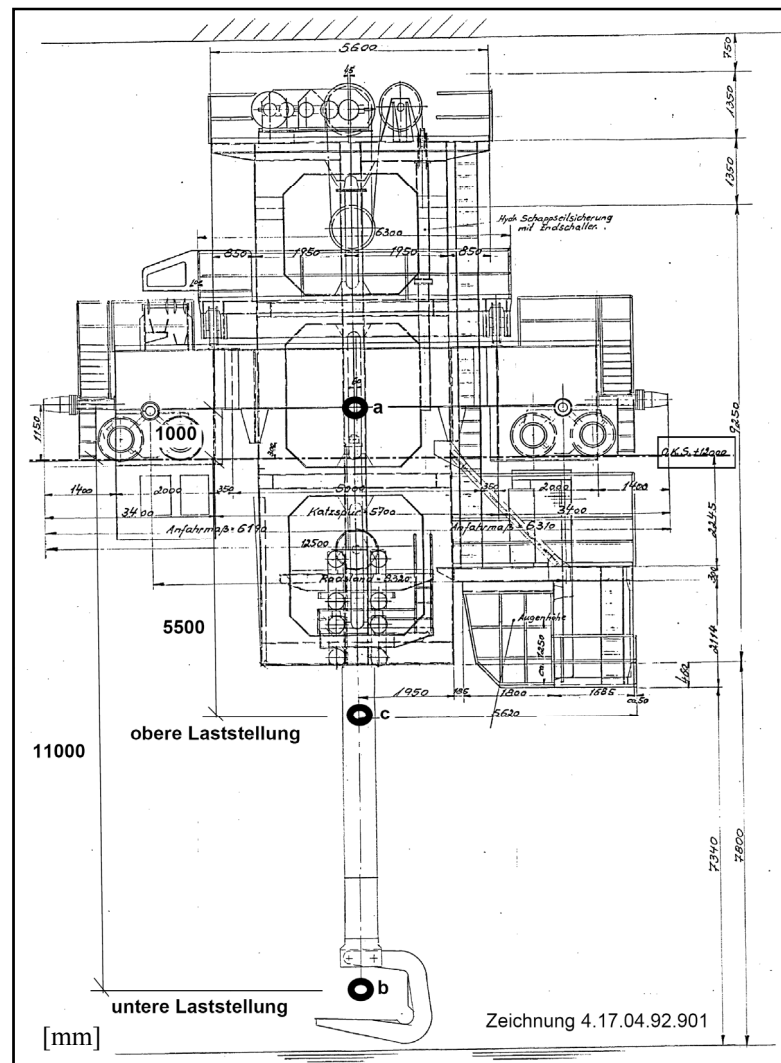


Abbildung 32: Schwerpunktlagen Laufkatze

Für die maßgebende Betrachtung der Massenkräfte wird der Angriffspunkt der resultierenden Kraft mit der ungünstigsten Stellung des Baumes angesetzt. Das bedeutet, Katz- und Kranfahrt bei unterer Laststellung. Dabei werden die maximale Nutzlast und das Eigengewicht des Lastaufnahmemittels angesetzt.

$$F_{AKr} = m \cdot a$$

$$m = m_{Nutzlast} + m_{Dornpratze} = 32t + 3t = 35t$$

$$F_{AKr} = 35t \cdot 0,26 \frac{m}{s^2} = \underline{\underline{9,1kN}}$$

5.2.5 LF5 Massenkräfte aus Antrieb Katzfahrt Ka

Beschleunigung aus Katzfahrt:

Die Fortbewegung der Katze erfolgt über einen Mittenantrieb. Dieser treibt zwei der vier Katzräder über eine Antriebswelle an. Die beiden Antriebsräder sind dadurch drehzahlgekoppelt.

$$a_{Katz} = \frac{v_{Katz}}{t_{Anlauf}}$$

$$v_{Kran} = 55m / \text{min}$$

$$t_{Anlauf} = 8\text{sec}$$

$$a_{Kran} = \frac{55 \frac{m}{\text{min}}}{8\text{sec} \cdot 60} = \underline{\underline{0,12 \frac{m}{s^2}}}$$

$$F_{AKa} = m \cdot a$$

$$m = m_{Nutzlast} + m_{Dornpratze} = 32t + 3t = 35t$$

$$F_{AKr} = 35t \cdot 0,12 \frac{m}{s^2} = \underline{\underline{4,2kN}}$$

5.3 Bestimmung der Lastfallkombinationen nach DIN 15018

Die oben genannten Lastfälle (Abschnitt 5.2) werden untereinander kombiniert und zu sogenannten Lastgruppen gebildet. Aus diesen Lastgruppen werden die notwendigen Schnittgrößen für die Berechnung der Nennspannungen ermittelt.

Lastgruppe 1 (LG1) beinhaltet das Katzgewicht und die Hublast ohne Nutzlast jeweils ohne Lastbeiwerte.

Sie spiegelt den Ruhestand des Kranes wieder, d.h. Kranfahrt, Katzfahrt und Hubwerk stehen auf „Null“. Sie wird maßgebend für die Berechnung der Unterspannung sein.

Lastgruppe 2 (LG2) besteht nur aus der Hublast, jedoch mit Berücksichtigung lotrechter Massenkräfte durch den Hublastbeiwert ψ . Sie gibt wieder, wann Kran und Katze in Position stehen und nur das Hubwerk mit Nutzlast in Betrieb ist. Diese Gruppe wird maßgebend sein für die Untersuchung des Mittelträgers (QS5) des oberen Katzgerüsts aus Schadensfeststellung II (Abschnitt 9.1).

Lastgruppe 3 (LG3) kombiniert Eigengewicht der Katze und Hublast mit jeweils zugehörigem Lastbeiwert.

Lastgruppe 4 und 5 (LG4 und LG5) sind wie die vorherige aufgebaut, zusätzlich kommen noch jeweils die Massenkräfte aus Kranfahrt und Katzfahrt hinzu.

In der Lastgruppe 6 (LG6) werden alle Lastfälle mit Ausnahme von LF 2 (Hublast ohne Nutzlast) kombiniert und mit den jeweiligen Lastbeiwerten versehen. Sie wird maßgebend für die Ermittlung der Oberspannung sein.

Die Lastgruppen entsprechen der DIN 15018-1 Tab.7, bis auf eine Ausnahme. In LG6 werden Kranfahrt und Katzfahrt miteinander kombiniert, dies sieht die DIN nicht vor. In der Praxis jedoch werden Kranfahrt und Katzfahrt gleichzeitig ausgeführt, weshalb diese Lastfallkombination in dieser Arbeit Berücksichtigung findet.

Auflistung der Lastgruppen nach DIN 15018-1:

LG 1	$G + P_0$	$LF1 + LF2$
LG 2	Hublast P	$\psi \cdot LF3$
LG 3	$G + \text{Hublast P}$	$\varphi_e \cdot LF1 + \psi \cdot LF3$
LG 4	$G + \text{Hublast P} + \text{Katzfahrt}$	$\varphi_e \cdot LF1 + \psi \cdot LF3 + LF5$
LG 5	$G + \text{Hublast P} + \text{Kranfahrt}$	$\varphi_e \cdot LF1 + \psi \cdot LF3 + LF4$
LG 6	$G + \text{Hublast P} + \text{Katz- und Kranfahrt}$	$\varphi_e \cdot LF1 + \psi \cdot LF3 + LF4 + LF5$

6 Lastannahmen nach DIN EN 13001-2

Wie in der Vorgängernorm (DIN 15018) sind die auf den Kran einwirkenden Lasten in drei Gruppen eingeteilt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Einteilung der Lasten nach DIN EN 13001-2

regelmäßige Lasten	nicht-regelmäßige Lasten	außergewöhnliche Lasten
Beschleunigung aus Anheben und Gravitation, auf die Masse des Krans wirkend	Lasten aus Wind in Betrieb	Lasten aus Anheben einer Last vom Boden mit maximaler Hubgeschwindigkeit
Trägheit und Gravitation, auf die Hublast wirkend	Lasten aus Schräglauf	Lasten aus Wind außer Betrieb
Lasten aus Fahren über Unebenheiten	Schnee- und Eislasten	Prüflasten
Massenkräfte aus Antrieben	Lasten aus Wärmeeinwirkungen	Lasten aus Pufferstoß
Lasten aus Weggrößen (z.B. Vorspannung)		Lasten aus Kippkräften
		Lasten aus Notaus
		Lasten aus Triebwerksversagen
		Lasten aus äußerer Anregung des Untergrundes
		Lasten aus Montage

6.1 Regelmäßige Lasten

In Bezug auf die Betrachtung der Ermüdung wird sich auf die Lastkategorie „regelmäßige Lasten“ beschränkt, wobei die einzelnen Sicherheitsbeiwerte γ_p bzw. γ_f jeweils auf „eins“ gesetzt werden.

Lasten aus „Weggrößen“ (Tabelle 7; Spalte 1) werden nicht berücksichtigt, da keine konstruktionsbedingten Weggrößen, wie z.B. Vorspannungen vorhanden sind.

Lasten aus „Fahren über Unebenheiten“ (Tabelle 7; Spalte 1) finden ebenfalls keine Berücksichtigung, da Unebenheiten wie Stufen und Lücken aufgrund geschweißter und bearbeiteter Schienenstöße nicht vorliegen.

6.1.1 Masse der Katze

Analog zur DIN 15018 (Abschnitt 5.1.1) fallen hierunter alle Gewichtskräfte der Katze, mechanisch oder elektrisch, fest oder beweglich, mit Ausnahme des Lastaufnahmemittels und der Nutzlast.

6.1.2 Masse der Hublast

Auch die Hublast wird analog zur DIN 15018 (Abschnitt 5.1.2) betrachtet, d.h. hierunter fallen die Nutzlast (z.B. Coil) sowie alle zusätzlich vertikal bewegten Lasten (z.B. Traverse).

6.1.3 Massenkräfte aus Antrieben

Die Massenkräfte aus Antrieben werden ebenfalls nach 15018 (Abschnitt 5.1.3) behandelt.

6.1.4 dynamische Faktoren

Tabelle 8: dynamische Faktoren φ_i nach DIN EN 13001-2 [6]

regelmäßige Lasten	Faktor
Beschleunigung aus Anheben und Gravitation, auf die Masse des Krans wirkend	φ_1
Trägheit und Gravitation, vertikal auf die Hublast wirkend	-
- Anheben einer unbehinderten Last vom Boden	φ_2
- Abwurf eines Teils der Hublast	φ_3
Lasten aus Fahren über Unebenheiten	φ_4
Massenkräfte aus Antrieben	φ_5
außergewöhnliche Lasten	Faktor
Prüflasten	φ_6
Lasten aus Pufferstoß	φ_7

Der Faktor φ_3 berücksichtigt die dynamische Einwirkung beim Abwerfen oder Loslassen eines Teils der Hublast. Dieser Aspekt kann bei diesem Kran vernachlässigt werden, da er weder mit einem Greifer noch mit einem Magneten als Lastaufnahmemittel ausgestattet ist. Der vorhandene C-Haken (Dornpratze) ist im Vergleich dazu relativ lastabsturzsicher.

Der Faktor φ_4 wird nicht berücksichtigt, da wie in Abschnitt 6.1 bereits erwähnt, keine Unebenheiten, wie Lücken und Stufen entlang der Schienen, vorliegen.

6.1.4.1 Bestimmung Faktor φ_1

Durch Heben und Senken der Hublast entsteht nicht nur eine höhere Hublasteinwirkung, sondern auch eine Schwingungsanregung des Tragwerks. Diese wird mit dem dynamischen Faktor φ_1 berücksichtigt. Der Wert δ ist abhängig von der Struktur des Tragwerks und nach Erfahrung zu wählen. Für den Kran 7 wird der Wert von 0,1 gewählt.

$$\boxed{\varphi_1 = 1 \pm \delta} \quad \delta = 0 \dots 0,1$$

$$\varphi_1 = 1 + 0,1 = \underline{1,1}$$

6.1.4.2 Bestimmung Faktor φ_2

Dieser dynamische Faktor ist vom Prinzip analog zum Hublastbeiwert ψ , nach DIN 15018, zu sehen. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Anfangsgeschwindigkeit detaillierter betrachtet wird.

Die Hubklassen HC1...HC4 sind mit der alten Einstufung in die Hubklassen H1...H4 gleichzusetzen. Anhand dieser, werden die Beiwerte β_2 und $\varphi_{2,min}$ bestimmt (Tabelle 9). Mittels Tabelle 10 wird der dritte Beiwert für die Bestimmung von φ_2 ermittelt: Die Hubgeschwindigkeit v_h in Abhängigkeit der Lastkombination sowie des Hubwerkstyps und der Betriebsart (Tabelle 10)

Tabelle 9: Bestimmung von β_2 und $\varphi_{2,min}$; [6]

Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,1
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,2

Tabelle 10: Bestimmung dynamischer Faktor φ_2 ; [6]

Hubwerkstyp und Betriebsart	Wert für v_h Lastkombination	
	A1, B1	C
Kein Feinhub vorhanden oder Beginn des Hubvorganges ohne Feinhub möglich	max. Hubgeschwindigkeit	-
Beginn des Hubvorganges nur mit Feinhub möglich	Feinhubgeschwindigkeit	max. Hubgeschwindigkeit
automatische Feinhubzuschaltung, bis die Last vom Boden angehoben ist	Feinhubgeschwindigkeit	-
Beginn des Hubvorganges mit stetigem Hochlaufen der Geschwindigkeit	0,5 x max. Hubgeschwindigkeit	max. Hubgeschwindigkeit
Die Antriebssteuerung stellt sicher, dass der Geschwindigkeitsfluss auf die dynamische Last vernachlässigbar ist	0	0,5 x max. Hubgeschwindigkeit

Berechnung von φ_2 nach Tabelle 10:

$$\boxed{\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h} \quad \beta_2 = 0,51 \quad \varphi_{\min,2} = 1,15 \quad v_h = 0,265 \frac{m}{\text{sec}}$$

$$\varphi_2 = 1,15 + 0,51 \cdot 0,265 = \underline{1,29}$$

6.1.4.3 Bestimmung Faktor φ_5

Die Lasteinwirkung S wird auf die Bauteile angesetzt, die den Antriebskräften von Kranfahrt und Katzfahrt ausgesetzt sind. Zur Berücksichtigung elastischer Effekte wird ein Beiwert φ_5 hinzugefügt. (Tabelle 11)

Tabelle 11: Bestimmung dynamischer Faktor φ_5 ; [6]

Anwendungsbereich	φ_5
bei Fliehkräften	$\varphi_5 = 1$
bei Antrieben ohne Spiel oder in Fällen, in denen ein bestehendes Spiel die dynamischen Kräfte nicht beeinflusst. Die Änderung der Kräfte ist stetig.	$1 \leq \varphi_5 \leq 1,5$
bei Antrieben ohne Spiel oder in Fällen, in denen ein bestehendes Spiel die dynamischen Kräfte nicht beeinflusst. Die Änderung der Kräfte erfolgt plötzlich	$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2$
bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel	$\varphi_5 = 3$

Aufgrund der Antriebssituation (Zentralantriebe bei Kran- und Katzfahrt) wird mit beträchtlichem Spiel gerechnet und damit der φ_5 -Wert auf drei gesetzt.

6.2 Bestimmung der Lastfälle nach DIN 13001-2

Die folgenden Lastfälle nach DIN 13001-2 sind analog zu den Lastfällen in Abschnitt 5.2, Seite 23 zu betrachten. Da die Bezeichnungen der Lasten variieren wurden die Lastfälle neu nummeriert, beginnend von LF11 bis LF15.

6.2.1 LF11 Masse Katze

$$f_1 \approx \underline{\underline{39t}}$$

6.2.2 LF12 Masse Hublast ohne Nutzlast

$$f_{2*} \approx \underline{\underline{17,5t}}$$

6.2.3 LF13 Masse Hublast

$$f_2 \approx \underline{\underline{49,5t}}$$

6.2.4 LF14 Massenkräfte aus Antrieb Kranfahrt

$$F_{Kr} = 35t \cdot 0,26 \frac{m}{s^2} = \underline{\underline{9,1kN}}$$

6.2.5 LF15 Massenkräfte aus Antrieb Katzfahrt

$$F_{Ka} = 35t \cdot 0,12 \frac{m}{s^2} = \underline{\underline{4,2kN}}$$

6.3 Bestimmung der Lastfallkombinationen nach DIN EN 13001-2

LG11
$$\gamma_{p1} \cdot LF11 + \gamma_{p2} \cdot LF12$$

LG12
$$\gamma_{p2} \cdot \varphi_2 \cdot LF13$$

LG13
$$\gamma_{p1} \cdot \varphi_1 \cdot LF1 + \gamma_{p2} \cdot \varphi_2 \cdot LF3$$

LG14
$$\gamma_{p1} \cdot \varphi_1 \cdot LF1 + \gamma_{p2} \cdot \varphi_2 \cdot LF3 + \gamma_{p4} \cdot \varphi_5 \cdot LF5$$

LG15
$$\gamma_{p1} \cdot \varphi_1 \cdot LF1 + \gamma_{p2} \cdot \varphi_2 \cdot LF3 + \gamma_{p4} \cdot \varphi_5 \cdot LF4$$

LG16
$$\gamma_{p1} \cdot \varphi_1 \cdot LF1 + \gamma_{p2} \cdot \varphi_2 \cdot LF3 + \gamma_{p4} \cdot \varphi_5 \cdot LF4 + \gamma_{p4} \cdot \varphi_5 \cdot LF5$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{p1} bis γ_{p4} werden bzgl. der Betrachtung der Ermüdungsfestigkeit auf „eins“ gesetzt.

Die dynamischen Faktoren φ_1 bis φ_5 sind dem Abschnitt 6.1.4 zu entnehmen.

7 Nachweise für Schadensfeststellung I (Querschnitt 9)

In diesem Abschnitt wird der Querschnitt 9 (U-400) des Katzrahmens bzgl. der Ermüdungsfestigkeit untersucht. Dies geschieht durch einen Betriebsfestigkeitsnachweis DIN 15018 (Abschnitt 7.2). Zusätzlich wird ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach DIN EN 1993-1-9 (Abschnitt 7.3) durchgeführt.

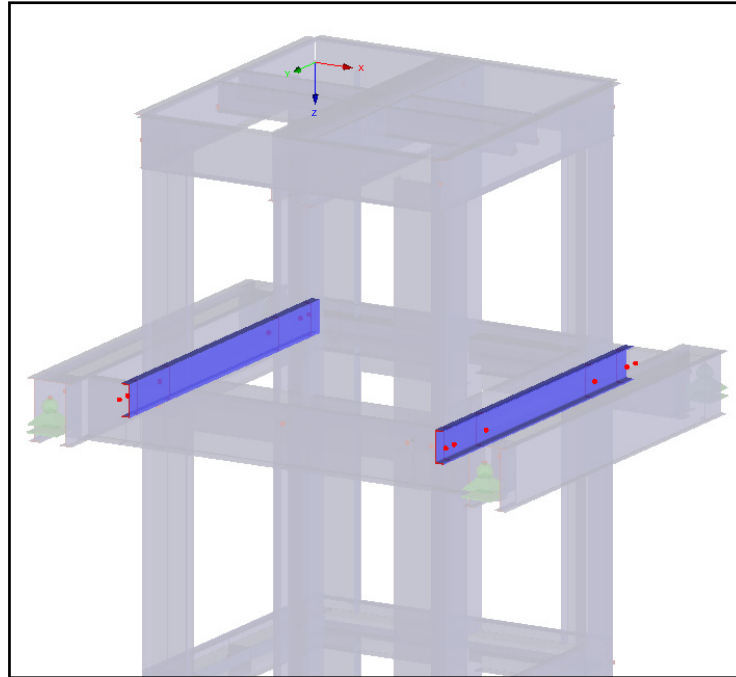


Abbildung 33: Selektion QS 9 (U-400)

7.1 Bestimmung der Schnittgrößen und Spannungen an Stelle $x = 0,73\text{m}$

Zunächst werden die Schnittgrößen der Lastfälle und Lastfallgruppen sowie die zugehörigen Spannungen ermittelt. Dies geschieht mit dem Stabwerksprogramm RSTAB für die Schnittgrößen und dem Zusatzmodul STAHL für die Spannungen. Die Ergebnisse für die Lastfälle LF1 bis LF5 bzw. LF11 bis LF15 sind identisch und werden in einer Tabelle dargestellt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Schnittgrößen für LF1 bis LF5; (Anhang A)

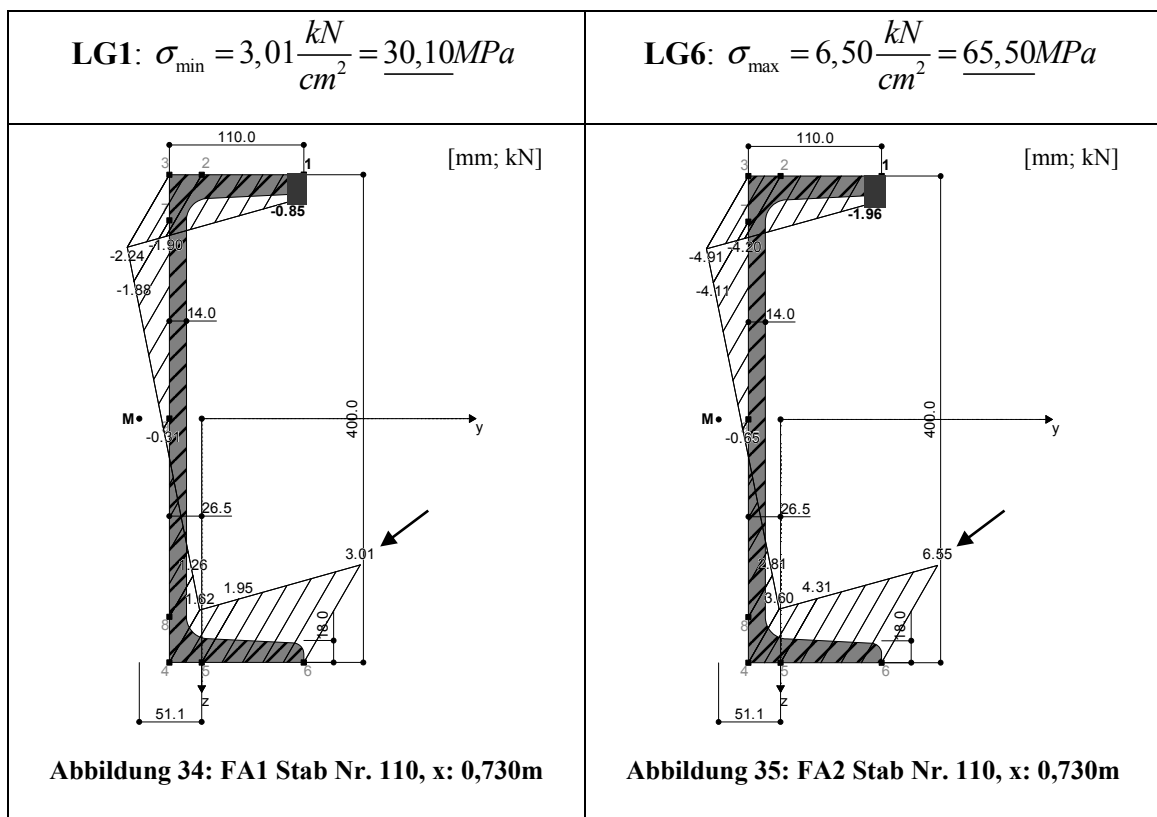
Lastfall Nr.	Stelle x [m]	Kräfte [kN]			Momente [kNm]		
		N	V_y	V_z	M_T	M_y	M_z
LF 1 / LF11	0,73	1,33	1,78	15,55	0,01	13,04	-0,70
LF 2 / LF12	0,73	0,96	0,94	7,95	0,00	6,59	-0,37
LF 3 / LF13	0,73	2,70	2,66	22,48	0,01	18,65	-1,05
LF 4 / LF14	0,73	0,28	0,15	2,23	0,00	1,86	-0,04
LF 5 / LF15	0,73	-0,21	-0,03	1,28	0,00	1,00	0,02

7.1.1 Schnittgrößen und Spannungen für LG1 bis LG6 (DIN 15018)

Tabelle 13: Schnittgrößen und Spannungen für LG1 bis LG6; (Anhang A)

Lastgruppe	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			Spannungen [kN/cm ²]		
		N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	σ	τ	σ _v
LG 1	0,73	2,28	2,72	23,49	0,01	19,63	-1,07	3,01	0,53	3,01
LG 2	0,73	3,79	3,73	31,41	0,02	26,11	-1,48	4,10	0,72	4,11
LG 3	0,73	5,25	5,69	48,57	0,03	40,45	-2,24	6,29	1,11	6,29
LG 4	0,73	5,03	5,66	49,86	0,03	41,54	-2,22	6,39	1,13	6,39
LG 5	0,73	5,53	5,84	50,81	0,03	42,31	-2,29	6,45	1,17	6,45
LG 6	0,73	5,32	5,81	52,09	0,03	43,31	-2,27	6,55	1,19	6,55

Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen eine Darstellung der Spannungen für LG1 und LG6 am Querschnitt 5 (U-400) an der Stelle x = 0,730m. Dies ist der markante Bereich, bei dem die Rissbildungen am Katzrahmen aufgetreten sind.

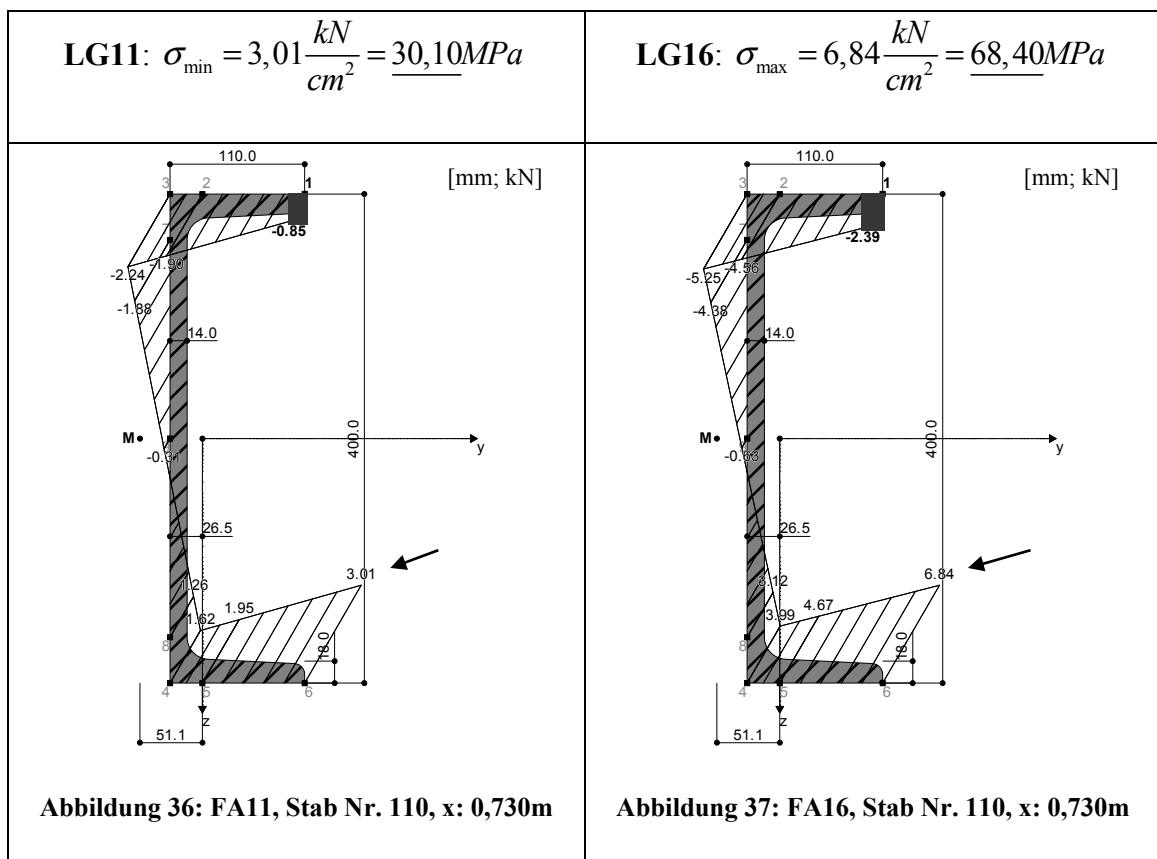


7.1.2 Schnittgrößen und Spannungen für LG11 bis LG16 (DIN EN 13001)

Tabelle 14: Schnittgrößen und Spannungen für LG11 bis LG16; (Anhang A)

Lastgruppe Nr.	Stelle x [m]	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			Spannungen [kN/cm ²]		
		N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	σ	τ	σ _v
LG 11	0,73	2,28	2,72	23,49	0,01	19,63	-1,07	3,01	0,54	3,01
LG 12	0,73	3,49	3,43	29,00	0,02	24,06	-1,36	3,74	0,66	3,74
LG 13	0,73	4,95	5,40	46,10	0,03	38,40	-2,13	5,93	1,06	5,93
LG 14	0,73	4,31	5,30	49,95	0,03	41,41	-2,06	6,15	1,15	6,15
LG 15	0,73	5,80	5,86	52,81	0,03	43,97	-2,26	6,61	1,21	6,62
LG 16	0,73	5,16	5,76	56,65	0,03	46,98	-2,20	6,84	1,30	6,84

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen eine Darstellung der Spannungen für LG11 und LG16 am Querschnitt 5 (U-400) an der Stelle x = 0,730m.



7.2 Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 15018

In der DIN 15018 wird der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit als Betriebsfestigkeitsnachweis durchgeführt und somit die Sicherheit des Bauteils gegen Versagen bei zyklischer Beanspruchung untersucht. Dabei werden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt:

Die Spannungsspielzahl N , das Spannungskollektiv S , das Grenzspannungsverhältnis κ , die Kerbwirkung und die Stahlsorte.

7.2.1 vorhandene Ober- und Unterspannung

7.2.1.1 Oberspannung σ_o

Die Oberspannung ergibt sich aus der Lastgruppe LG6 (Abbildung 35).

$$LG6 = \varphi_e \cdot LF1 + \psi \cdot LF3 + LF4 + LF5$$

$$LF1 = G = 390 \text{ kN} \quad LF3 = P = 495 \text{ kN} \quad LF4 = Kr = 9,1 \text{ kN} \quad LF5 = Ka = 4,2 \text{ kN}$$

$$\varphi_e = 1,1 \quad \psi = 1,4$$

$$\sigma_o = \underline{\underline{65,50 \text{ MPa}}}$$

7.2.1.2 Unterspannung σ_u

Die Unterspannung ergibt sich aus der Lastgruppe LG1 (Abbildung 34).

$$LG1 = LF1 + LF2$$

$$LF1 = G = 390 \text{ kN} \quad LF2 = P_0 = 175 \text{ kN}$$

$$\sigma_u = \underline{\underline{30,10 \text{ MPa}}}$$

7.2.2 Kerbfälle nach DIN 15018

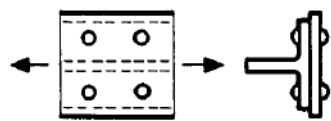
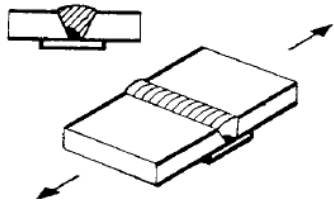
Der Einfluss der Kerbwirkung auf die Ermüdungsfestigkeit wird durch die Klassifizierung von Konstruktionsdetails berücksichtigt. Diese werden in Kerbfallklassen unterteilt. Die DIN 15018 unterteilt sie in Schraub- und Nietverbindungen (W-Gruppe) und in Schweißverbindungen (K-Gruppe).

Die erste Ziffer steht für die Kerbfallgruppe. Je größer die Ziffer, desto höher ist dabei die Kerbwirkung. Die zweite und dritte Ziffer stellen die eigentliche Ordnungsnummer dar. Sie steht für die Zuordnung der unterschiedlichen Konstruktionsdetails.

Anhand der Tabelle 15 wurden zwei Kerbfälle herausgenommen. Der Kerbfall W22 berücksichtigt die Bohrungen der Winkelverbindungen im Querschnitt 9 (U-400). Diese Kerbwirkung ist maßgebend für die Betrachtung der bisherigen Nutzungsdauer von 47 Jahren.

Der Kerbfall K311 ist maßgebend für die Restnutzungsdauer von 4 Jahren und spiegelt die Reparaturschweißungen am Querschnitt 9 (U-400) wider.

Tabelle 15: Auszug aus Kerbfalltabelle DIN 15018-1; [3]

Nr.	Beschreibung	Darstellung
W22	gelochte Teile bei einschnittigen, aber gestützten Niet- oder Schraubenverbindungen	
K311	mit einseitig auf Wurzelunterlage geschweißte Stumpfnahht quer zur Krafrichtung verbundene Teile	

7.2.3 Berechnungskollektiv

Anhand von Spannungsspielbereich und Spannungskollektiv wird die Beanspruchungsgruppe bestimmt.

Für die Betrachtung der bisherigen Nutzungsdauer von 47 Jahren und einer Spannungsspielzahl von $2 \cdot 10^7$ sowie einem Spannungskollektiv S3 erhält man die Beanspruchungsgruppe B6.

Für die Betrachtung der Restnutzungsdauer von 4 Jahren und einer Spannungsspielzahl von $2 \cdot 10^6$ sowie einem Spannungskollektiv S3, erhält man auch die Beanspruchungsgruppe B6 (Tabelle 16).

Tabelle 16: Berechnungskollektive; [3]

Spannungsspielbereich	N1	N2	N3	N4
Gesamte Anzahl der vor- gesehenen Spannungsspiele N	$> 2 \cdot 10^4$	$> 2 \cdot 10^5$	$> 6 \cdot 10^5$	$> 2 \cdot 10^6$
	$< 2 \cdot 10^5$	$< 6 \cdot 10^5$	$< 2 \cdot 10^6$	
	lange Ruhezeiten		regelmäßige Nutzung	
Spannungskollektiv	Beanspruchungsgruppe			
S0 sehr leicht	B1	B2	B3	B4
S1 leicht	B2	B3	B4	B5
S2 mittel	B3	B4	B5	B6
S3 schwer	B4	B5	B6	B6

7.2.4 Bestimmung der zulässigen Spannung $\sigma_{D(-1)}$

Die zulässige Oberspannung $\sigma_{D(-1)}$ für das Grenzspannungsverhältnis $\kappa = -1$ wird anhand der Beanspruchungsgruppe und dem zugehörigen Kerbfall nach Tabelle 17 bestimmt.

Tabelle 17: Grundwerte der zulässigen Spannungen $\sigma_{D(-1)}$ für $\kappa = -1$ in N/mm²; [3]

Stahlsorte	S235			S235				
Kerbfall	W0	W1	W2	K0	K1	K2	K3	K4
Gruppe	zulässige Spannungen $\sigma_{D(-1)}$ für $\kappa = -1$							
B1	180	180	180	180	180	180	180	152,7
B2								108
B3		161,4	141,3			178,2	127,3	76,4
B4	169,7	135,8	118,8	168	150	126	90	54
B5	142,7	114,2	99,9	118,8	106,1	89,1	63,6	38,2
B6	120	96	84	84	75	63	45	27

Für die Betrachtung der bisherigen Laufzeit von 47 Jahren gilt:

$$\text{für S235, W2, } \kappa = -1, \text{ B6} \quad \rightarrow \quad \boxed{{}_{zul}\sigma_{D(-1)} = 84 \text{ MPa}}$$

Für die Betrachtung der Restlaufzeit von 4 Jahren gilt:

$$\text{für S235, K3, } \kappa = -1, \text{ B6} \quad \rightarrow \quad \boxed{{}_{zul}\sigma_{D(-1)} = 45 \text{ MPa}},$$

7.2.5 Bestimmung der zulässigen Oberspannung ${}_{zul}\sigma_{DZ(\kappa)}$

Die zulässige Oberspannung ${}_{zul}\sigma_{DZ(\kappa)}$ wird nach Tabelle 18 bestimmt.

Tabelle 18: Gleichungen für die zul. Oberspannungen in Abhängigkeit von κ und ${}_{zul}\sigma_{D(-1)}$; [3]

Wechselbereich $-1 < \kappa < 0$	Zug	${}_{zul}\sigma_{Dz(\kappa)} = \frac{5}{3-2 \cdot \kappa} \cdot {}_{zul}\sigma_{Dz(-1)}$
	Druck	${}_{zul}\sigma_{Dd(\kappa)} = \frac{2}{1-\kappa} \cdot {}_{zul}\sigma_{Dd(-1)}$
Schwellbereich $0 < \kappa < +1$	Zug	${}_{zul}\sigma_{Dz(\kappa)} = \frac{{}_{zul}\sigma_{Dz(0)}}{1 - \left(1 - \frac{{}_{zul}\sigma_{Dz(0)}}{0,75 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \kappa}$
	Druck	${}_{zul}\sigma_{Dd(\kappa)} = \frac{{}_{zul}\sigma_{Dd(0)}}{1 - \left(1 - \frac{{}_{zul}\sigma_{Dd(0)}}{0,9 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \kappa}$

Zuerst wird das Grenzspannungsverhältnis κ ermittelt. Es ist das Verhältnis der dem Betrag nach kleineren Grenzspannung (σ_{\min}) zu der dem Betrag nach größeren Grenzspannung (σ_{\max}).

Das Vorzeichen des Grenzspannungsverhältnis gibt Auskunft über den Beanspruchungsbereich: wechselnd ($-1 < \kappa < 0$) oder schwellend ($0 < \kappa < +1$). (Tabelle 18).

$$\kappa = \frac{|\sigma_{\min}|}{|\sigma_{\max}|} = \frac{30,1 \text{ MPa}}{65,5 \text{ MPa}} = 0,46$$

Mit einem Grenzspannungsverhältnis von $\kappa = 0,46$ und den vorliegenden Zugspannungen befindet man sich mit der Beanspruchung im Zug-Schwellbereich. Nach Tabelle 18 gilt folgende Formel:

$$\sigma_{DZ(\kappa)} = \frac{\sigma_{DZ(0)}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_{DZ(0)}}{0,75 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \kappa}$$

Um die zulässige Oberspannung $\sigma_{DZ(\kappa)}$ zu erhalten müssen noch die zulässige Spannung $\sigma_{DZ(0)}$, mit dem Grenzspannungsverhältnis $\kappa = 0$ und die Zugfestigkeit σ_B bestimmt werden.

$$\sigma_B = f_{u,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \rightarrow (\text{DIN 15018-1, S.11, Tabelle 8})$$

$$\sigma_{DZ(0)} = \frac{5}{3} \cdot \sigma_{DZ(-1)} \rightarrow (\text{DIN 15018-1; S.17, Bild 9})$$

Anhand dieser Werte kann die gesuchte zulässige Oberspannung $\sigma_{DZ(\kappa)}$ für $\kappa = 0,46$ bestimmt und der Nachweis geführt werden.

Die errechnete zulässige Oberspannung ist durch den zugehörigen statischen Lastfall HZ zu begrenzen. (DIN 15018-1, S.12 Tabelle 10 +11)

→ Lastfall HZ = 180MPa

7.2.5.1 Bestimmung der zulässigen Oberspannung $\sigma_{DZ(\kappa)}$ für Kerbfall W2

$$\sigma_{D(-1)} = 84MPa \rightarrow (\text{Abschnitt 7.2.4, Laufzeit 47 Jahre})$$

$$\sigma_{DZ(0)} = \frac{5}{3} \cdot \sigma_{DZ(-1)} = \frac{5}{3} \cdot 84MPa = 140MPa$$

$$\sigma_{DZ(\kappa)} = \frac{\sigma_{DZ(0)}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_{DZ(0)}}{0,75 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \kappa} = \frac{140MPa}{1 - \left(1 - \frac{140MPa}{0,75 \cdot 360MPa}\right) \cdot 0,46}$$

$$\sigma_{DZ(0,46)} = 179,83MPa < 180MPa$$

7.2.5.2 Bestimmung der zulässigen Oberspannung $zul\sigma_{DZ(\kappa)}$ für Kerbfall K3

$$\boxed{zul\sigma_{D(-1)} = 45MPa} \rightarrow (\text{Abschnitt 7.2.4, Restlaufzeit 4 Jahre})$$

$$\boxed{zul\sigma_{DZ(0)} = \frac{5}{3} \cdot zul\sigma_{DZ(-1)} = \frac{5}{3} \cdot 45MPa = 75MPa}$$

$$\boxed{zul\sigma_{DZ(\kappa)} = \frac{zul\sigma_{DZ(0)}}{1 - \left(1 - \frac{zul\sigma_{DZ(0)}}{0,75 \cdot \sigma_B}\right) \cdot \kappa}} = \frac{75MPa}{1 - \left(1 - \frac{75MPa}{0,75 \cdot 360MPa}\right) \cdot 0,46}$$

$$\boxed{zul\sigma_{DZ(0,46)}} = 112,31MPa < 180MPa$$

7.2.6 Betriebsfestigkeitsnachweis für 47 Jahre Laufzeit (W2)

$$\boxed{vorh\sigma \leq zul\sigma_{DZ(\kappa)}} \quad \frac{vorh\sigma}{zul\sigma_{DZ(0,6)}} \leq 1$$

$$\frac{65,5MPa}{179,83MPa} = 0,36 < 1$$

Der Betriebsfestigkeitsnachweis des Querschnitts 9 (U-400) für die bisherige Laufzeit von 47 Jahren wurde erfüllt.

7.2.7 Betriebsfestigkeitsnachweis für 4 Jahre Restlaufzeit (K3)

$$\boxed{vorh\sigma \leq zul\sigma_{DZ(\kappa)}} \quad \frac{vorh\sigma}{zul\sigma_{DZ(0,46)}} \leq 1$$

$$\frac{65,5MPa}{112,31MPa} = 0,58 < 1$$

Der Betriebsfestigkeitsnachweis des Querschnitts 9 (U-400) für die restliche Laufzeit von 4 Jahren wurde erfüllt.

7.3 Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach DIN EN 1993-1-9

Es gibt zwei Bemessungskonzepte zur Durchführung des Ermüdungsnachweises nach DIN EN 1993-1-9. Das Konzept der Schadenstoleranz und das Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung.

Beim ersten können Ermüdungsschäden behoben werden, indem planmäßige Inspektionen und Wartungen während der Nutzungsdauer durchgeführt werden. Das heißt, eine Zugänglichkeit zu den möglichen Schadensbereichen muss permanent gegeben sein.

Beim zweiten Konzept ist diese Zugänglichkeit nicht mehr gewährleistet. Somit fallen die planmäßigen Inspektionen zum Erkennen von Ermüdungsschäden in diesen Bereichen weg. Das Konzept ist immer dann anzuwenden, wenn ein Bauteil oder das gesamte Tragwerk aufgrund lokaler Rissausbildung unangekündigt versagen kann. [1]

Für den Kran 7 wird das Bemessungskonzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung verwendet.

Als Nachweisverfahren dient das Nennspannungskonzept:

Hier werden die Nennspannungen im Bauteil betrachtet. Die Kerbwirkung wird mit Hilfe von Kerbfallkatalogen verglichen und zugeordnet.

Mit der Schwingbreite $\Delta\sigma$ aus den Nennspannungen, dem zugehörigen Spannungsschwingspielen N und der zugehörigen Kerbfallklasse FAT wird anhand der Wöhlerlinien nach DIN EN 1993-1-9 der Ermüdungsfestigkeitsnachweis durchgeführt.

7.3.1 vorhandene Ober- und Unterspannung

7.3.1.1 Oberspannung σ_o

Die Oberspannung ergibt sich aus der Lastgruppe LG16.

$$LG16 = \gamma_{p1} \cdot \varphi_1 \cdot LF1 + \gamma_{p2} \cdot \varphi_2 \cdot LF3 + \gamma_{p4} \cdot \varphi_5 \cdot LF4 + \gamma_{p4} \cdot \varphi_5 \cdot LF5$$

$$LF1 = G = 390kN \quad LF3 = P = 495kN \quad LF4 = Kr = 9,1kN \quad LF5 = Ka = 4,2kN$$

$$\varphi_1 = 1,1 \quad \varphi_2 = 1,29 \quad \varphi_5 = 3,0 \quad \gamma_{p1} = \gamma_{p2} = \gamma_{p4} = 1,0$$

$$\sigma_o = 68,40MPa$$

7.3.1.2 Unterspannung σ_u

Die Unterspannung ergibt sich aus der Lastgruppe LG11.

$$LG11 = \gamma_{p1} \cdot LF11 + \gamma_{p2} \cdot LF12$$

$$LF11 = f_1 = 390kN \quad LF2 = f_{2*} = 175kN \quad \gamma_{p1} = \gamma_{p2} = 1,0$$

$$\sigma_u = 30,10MPa$$

7.3.2 Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$

Die Spannungsschwingbreite ergibt sich aus der Differenz von Oberspannung und Unterspannung.

$$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u = 68,4MPa - 30,10MPa = 38,30MPa$$

7.3.3 Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9

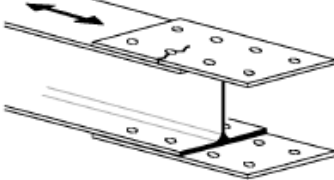

Nach DIN EN 1993-1-9 erfolgt die Unterteilung in sogenannte FAT-Klassen, Schwingfestigkeitsklassen.

Die Zahl steht für die Schwingbreite in MPa, für die Spannungsspielzahl $N=2 \cdot 10^6$. Beispiel: FAT 80 bedeutet, bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen gilt eine Schwingbreite $\Delta\sigma$ von 80MPa. Im Gegensatz zur DIN 15018 ist die höhere Kerbfallklasse diejenige, die eine größere zulässige Schwingbreite besitzt. Das heißt je höher die FAT-Klasse, desto geringer die Kerbwirkung. Die Höhe der FAT-Klasse ist abhängig von der Zuordnung der unterschiedlichen Konstruktionsdetails.

Anhand der Tabelle 19 wurden zwei Kerbfälle herausgenommen. Der Kerbfall FAT 80 berücksichtigt die Bohrungen der Winkelverbindungen im Querschnitt 9 (U-400). Der Durchmesser der Bohrungen beträgt 24mm. Diese Kerbwirkung ist maßgebend für die Betrachtung der bisherigen Nutzungsdauer von 47 Jahren.

Der Kerbfall FAT 50 ist maßgebend für die Restnutzungsdauer von 4 Jahren und spiegelt die Reparaturschweißungen am Querschnitt 9 wieder: Eine einseitig geschweißte V-Naht mit verbleibender Schweißbadsicherung.

Tabelle 19: Auszug aus Kerbfallkatalog von DIN EN 1993-1-9:2005; [1]

FAT	Beschreibung	Konstruktionsdetail
80	Winkelanschluss: einschnittige Verbindung mit Passschrauben	
50	Quernähte mit verbleibender Schweißbadsicherung („keine gute Passgenauigkeit sichergestellt“)	

7.3.4 Spannungsspielzahlen N

Die Spannungsspielzahl N erfährt in der DIN EN 1993-1-9 eine größere Bedeutung als in der DIN 15018. Sie bildet die Abszisse im Wöhlerdiagramm und gibt zusammen mit der Schwingbreite $\Delta\sigma$ (Ordinate) eine konkrete Auskunft über die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils.

7.3.4.1 bisherigen Nutzungsdauer von 47 Jahren

Bei ca. 1000 Hüben pro Tag, auf eine Dauer von 47 Jahren gerechnet, ergibt sich folgende Schwingspielzahl:

$$1000 \cdot 365 \cdot 47 = 17155000 \approx 1,8 \cdot 10^7 \text{ Schwingspiele}$$

7.3.4.2 Restnutzungsdauer von 4 Jahren

Bei ca. 1000 Hüben pro Tag, auf eine Dauer von noch 4 Jahren gerechnet, ergibt sich folgende Schwingspielzahl:

$$1000 \cdot 365 \cdot 4 = 1460000 \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ Schwingspiele}$$

7.3.5 Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F,f}$ und $\gamma_{M,f}$

Nachweise nach DIN EN 1993-1-9 werden mit Teilsicherheitsfaktoren berechnet. Diese werden auf der Lastseite und auf der Widerstandsseite angewandt. Für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit des Querschnitts 9 (U-400) werden folgende Teilsicherheitsbeiwerte verwendet.

7.3.5.1 Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,f}$ für die Ermüdungsbelastung

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,f}$ für die Ermüdungsbelastung wird nach DIN EN 1993-1-9 mit 1,0 definiert.

$$\gamma_{Ff} = 1,0$$

7.3.5.2 Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,f}$ für den Werkstoffwiderstand

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,f}$ für den Werkstoffwiderstand ist abhängig von der Zugänglichkeit, Bauweise und Prüfbarkeit des Bauteils.

Aufgrund bedingter Zugänglichkeit für regelmäßige Inspektionen wird das Bemessungskonzept mit Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung festgelegt. Die Schadensfolgen werden als hoch eingestuft, da bei Versagen des zu untersuchenden Bauteils mit starken Beschädigungen von Mensch und Maschine zu rechnen ist sowie einer Unterbrechung in der Prozesskette Warmwalzwerk – Transport. Nach Tabelle 20 ergibt sich ein Beiwert von:

$$\gamma_{Mf} = 1,35$$

Tabelle 20: Empfehlungen für γ_{Mf} Faktoren; [1]

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

7.3.6 Bestimmung der „zulässigen“ Schwingbreiten $\Delta\sigma$ mit Wöhlerlinien nach DIN EN 1993-1-9

Der Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9 wird anhand der Wöhlerlinien durchgeführt. „Die Wöhlerlinien liegen in Form eines Rasters von Geraden mit der Neigung $m = 3$ über den im doppeltlogarithmischen Maßstab aufgetragenen Achsen $\Delta\sigma_R$ und N_R vor. Die einzelnen Wöhlerlinien (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_u \approx 97,5\%$) sind durch den Wert $\Delta\sigma_C$ gekennzeichnet, der die Beanspruchbarkeit bei $N = 2 \cdot 10^6$ wiedergibt. Die Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ wird bei $N = 5 \cdot 10^6$ Lastwechseln angenommen.“ [18] S.286

7.3.6.1 „zulässige“ Schwingbreite $\Delta\sigma$ für 47 Jahre Laufzeit

Anhand der Abbildung 38 wird die „zulässige“ Schwingbreite $\Delta\sigma$ die Laufzeit von 47 Jahren ermittelt. Für diese Betrachtung wurden bereits der Kerbfall FAT 80 (Abschnitt 7.3.3) und die Spannungsspielzahl $N = 1,8 \cdot 10^7$ (Abschnitt 7.3.4) bestimmt.

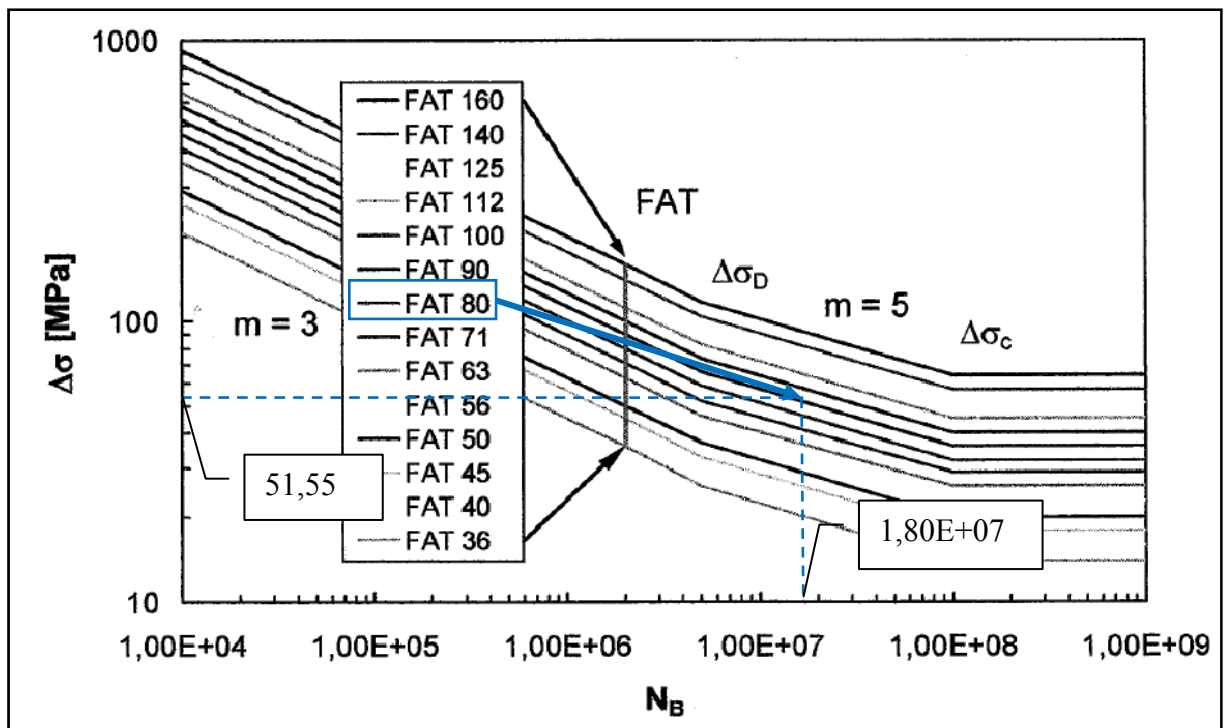


Abbildung 38: Wöhlerlinien; FAT 80; $N = 1,8 \cdot 10^7$; Laufzeit 47 Jahre; [15]

Um die „zulässige“ Schwingbreite für die Laufzeit von 47 Jahren zu berechnen, wird folgende Formel angewandt:

$$\frac{\Delta\sigma, B}{\Delta\sigma, A} = \left(\frac{N, A}{N, B} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)} \quad \Delta\sigma, B = \Delta\sigma, A \cdot \left(\frac{N, A}{N, B} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)}$$

$$\begin{array}{l} \Delta\sigma, A = 80 \text{ MPa} \\ N, A = 2 \cdot 10^6 \\ N, B = 1,8 \cdot 10^7 \\ m = 5 \end{array} \quad \Delta\sigma, B = 80 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 10^7} \right)^{\left(\frac{1}{5} \right)} = \underline{51,55 \text{ MPa}}$$

7.3.6.2 „zulässige“ Schwingbreite $\Delta\sigma$ für 4 Jahre Restlaufzeit

Anhand der Abbildung 39 wird die Restlaufzeit von 4 Jahren betrachtet, für die der Kerbfall FAT 50 (Abschnitt 7.3.3) und die Spannungsspielzahl $N = 1,5 \cdot 10^6$ (Abschnitt 7.3.4) bestimmt wurden.

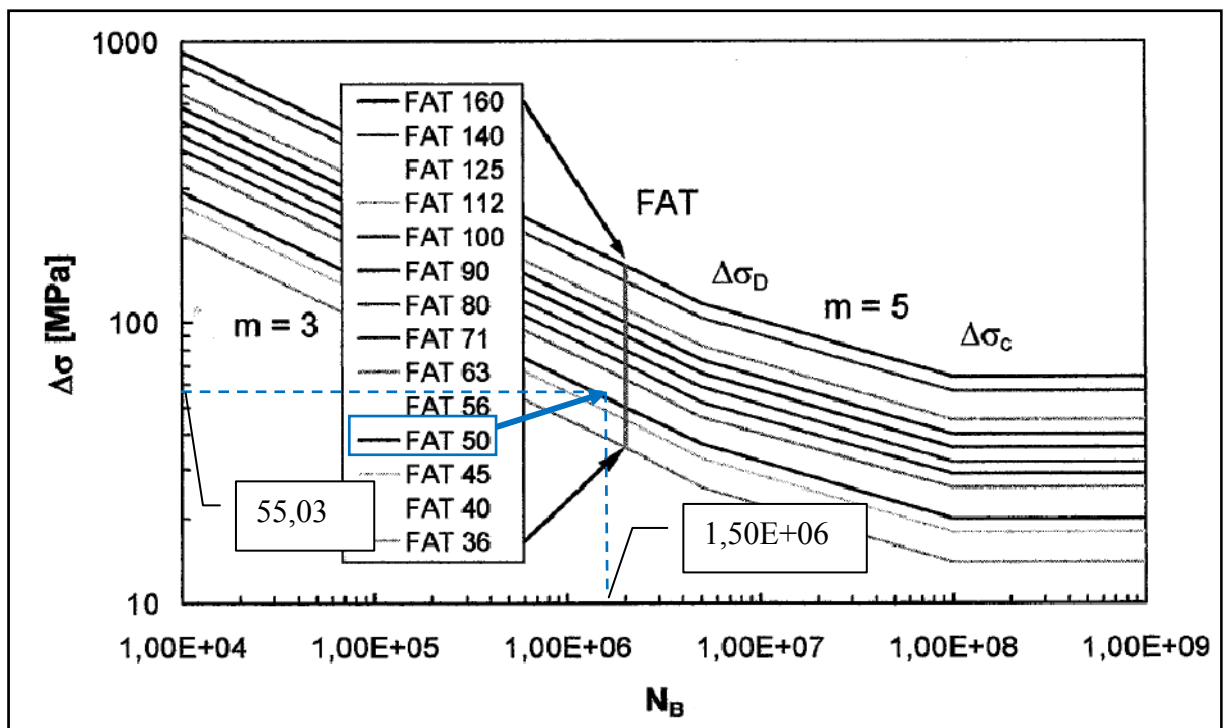


Abbildung 39: Wöhlerlinien; FAT 50; $N=1,5 \cdot 10^6$; Restlaufzeit 4 Jahre; [15]

Um die „zulässige“ Schwingbreite für die Restlaufzeit von 4 Jahren zu berechnen wird folgende Formel angewandt:

$$\frac{\Delta\sigma, B}{\Delta\sigma, A} = \left(\frac{N, A}{N, B} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)} \quad \Delta\sigma, B = \Delta\sigma, A \cdot \left(\frac{N, A}{N, B} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)}$$

$$\begin{array}{l} \Delta\sigma, A = 50 \text{ MPa} \\ N, A = 2 \cdot 10^6 \\ N, B = 1,5 \cdot 10^6 \\ m = 3 \end{array} \quad \Delta\sigma, B = 50 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} = \underline{\underline{55,03 \text{ MPa}}}$$

7.3.6.3 Nachweis für 47 Jahre Laufzeit:

$$\begin{array}{l} \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma}{\frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \end{array} \quad \left| \begin{array}{lll} \Delta\sigma = 38,3 \text{ MPa} & \gamma_{Ff} = 1,0 & \gamma_{Mf} = 1,35 \\ \Delta\sigma_R = 51,55 \text{ MPa} & \text{mit } N = 1,8 \cdot 10^7 \text{ und } FAT = 80 & \end{array} \right.$$

$$\frac{1,0 \cdot 38,3 \text{ MPa}}{\frac{51,55 \text{ MPa}}{1,35}} = \underline{\underline{1,003 > 1,0}}$$

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis des Querschnitts 9 (U-400) ist bzgl. der bisherigen Laufzeit von 47 Jahren, einer Schwingspielzahl von $N = 1,8 \cdot 10^7$, der Kerbfallklasse $FAT = 80$ und einer Schwingbreite $\Delta\sigma = 38,3 \text{ MPa}$ als nicht erfüllt zu betrachten.

7.3.6.4 Nachweis für 4 Jahre Restlaufzeit

$$\begin{array}{l} \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma}{\frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \end{array} \quad \left| \begin{array}{lll} \Delta\sigma = 38,3 \text{ MPa} & \gamma_{Ff} = 1,0 & \gamma_{Mf} = 1,35 \\ \Delta\sigma_R = 55,03 \text{ MPa} & \text{mit } N = 1,5 \cdot 10^6 \text{ und } FAT = 50 & \end{array} \right.$$

$$\frac{1,0 \cdot 38,3 \text{ MPa}}{\frac{55,03 \text{ MPa}}{1,35}} = \underline{\underline{0,94 < 1,0}}$$

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis des Querschnitts 9 (U-400) ist bzgl. der Restlaufzeit von 4 Jahren, einer Schwingspielzahl von $N = 1,8 \cdot 10^6$, der Kerbfallklasse $FAT = 50$ und einer Schwingbreite $\Delta\sigma = 38,3 \text{ MPa}$ als erfüllt zu betrachten.

8 Normengegenüberstellung

Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse von DIN 15018, DIN EN 13001-2 und DIN EN 1993-1-9

DIN 15018		DIN EN 13001-2	
maßgebender Lastfall für die Unterspannung			
$LG1 = LF1 + LF2$		$LG11 = \gamma_{p_1} \cdot LF11 + \gamma_{p_2} \cdot LF12$	
maßgebender Lastfall für die Oberspannung			
$LG6 = \varphi_e \cdot LF1 + \psi \cdot LF3 + LF4 + LF5$		$LG16 = \gamma_{p_1} \cdot \varphi_1 \cdot LF1 + \gamma_{p_2} \cdot \varphi_2 \cdot LF3 + \gamma_{p_4} \cdot \varphi_5 \cdot LF4 + \gamma_{p_5} \cdot \varphi_5 \cdot LF5$	
Unterspannung σ_u			
$\sigma_u = \underline{\underline{30,10MPa}}$		$\sigma_u = \underline{\underline{30,10MPa}}$	
Oberspannung σ_o			
$\sigma_o = \underline{\underline{65,50MPa}}$		$\sigma_o = \underline{\underline{68,40MPa}}$	
Kerbfall für bisherige Nutzungsdauer von 47 Jahren			
W22		FAT80	
Kerbfall für Restnutzungsdauer von 4 Jahren			
K311		FAT50	
Betriebsfestigkeitsnachweis DIN 15018		Ermüdungsfestigkeitsnachweis DIN EN 1993-1-9	
$\frac{\sigma_{vorh}}{\sigma_{zul}^{DZ(\kappa)}} \leq 1,0$		$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma}{\gamma_{Mf} \cdot \Delta \sigma_R} \leq 1,0$	
(47 Jahre) für W22:	0,36 < 1,0	(47 Jahre) für FAT80:	1,003 > 1,0
(4 Jahre) für K311:	0,58 < 1,0	(4 Jahre) für FAT50:	0,94 < 1,0

Betrachtet man die Lastannahmen beider Normen, so ist festzustellen, dass die Hauptbestandteile der DIN 15018 in der Nachfolgenorm übernommen wurden.

Lediglich die Namensgebungen haben sich verändert. Haupt-, Zusatz-, und Sonderlasten (Abschnitt 5) sind jetzt regelmäßige, nicht-regelmäßige und außergewöhnliche Lasten (Abschnitt 6).

Neuerungen sind bei den Schwingbeiwerten zu finden. In der älteren Norm gibt es zwei, den Eigenlastbeiwert φ_e und den Hublastbeiwert ψ (Abschnitt 5.1.4). Nach der neuen Norm existieren insgesamt sieben sogenannte dynamische Faktoren: φ_1 bis φ_7 (Abschnitt 6.1.4). Dadurch können detailliertere Aussagen über die Art der Lastaufnahmemittel, die Beschaffenheit der Kranbahnen und die Antriebsarten getroffen werden. Die Grundaufgabe der Beiwerte, die Berücksichtigung von Stoßvorgängen während des Kranbetriebes, hat sich jedoch nicht geändert.

Die Gegenüberstellung der Normen zeigt, dass die Unterschiede bzgl. der Ober- und Unterspannung sehr gering ausfallen, die Kerbfälle und Nachweise auf Ermüdung jedoch unterschiedlich sind (Tabelle 21). Dies liegt meiner Meinung nach daran, dass die Ober- und Unterspannungen auf den Lastannahmen basieren, die, wie oben beschrieben, kaum große Differenzen aufweisen.

Die Unterschiede in den Kerbfällen und den Ermüdungsnachweisen lassen sich aus meiner Sicht durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen bzgl. der Untersuchung von Ermüdungsbeanspruchung erklären. Die DIN 15018 sieht einen Betriebsfestigkeitsnachweis vor, der auf der Basis von zulässigen Spannungen, Spannungsspielzahlen, Spannungskollektiven, Kerbfällen und dem Grenzspannungsverhältnis beruht. Man bezeichnet dies auch als „Kappa-Verfahren“.

Die Ergebnisse bzgl. der Ermüdungsfestigkeit in der Gegenüberstellung, wurden auf der Grundlage der DIN EN 1993-1-9 (Eurocode 3) berechnet. Sie basieren auf dem Konzept der Nennspannungen, den daraus folgenden Schwingbreiten, den Kerbfallklassen (FAT) nach Katalog und mit Hilfe der Wöhlerlinien.

Fazit:

Ein direkter Vergleich der Ermüdungsnachweise ist meiner Meinung nach nicht möglich. Dafür sind die Berechnungskonzepte zu verschieden.

Will man dennoch eine Aussage treffen, welche Norm der Realität am nächsten kommt, fällt meine Wahl auf die Betrachtung der Ermüdungsfestigkeit nach der DIN EN 1993-1-9 mit den Wöhlerlinien. Die Ergebnisse des Nachweises für die bisherige Nutzungsdauer von 47 Jahren spiegeln sich in der Realität wider. Die Tatsache, dass die zukünftige Krannorm DIN EN 13001 im Teil 3-1 auf der gleichen Ebene wie der Eurocode 3 arbeitet, verstärkt die o.g. Auswahl.

9 Nachweis für Schadensfeststellung II (Querschnitt 5)

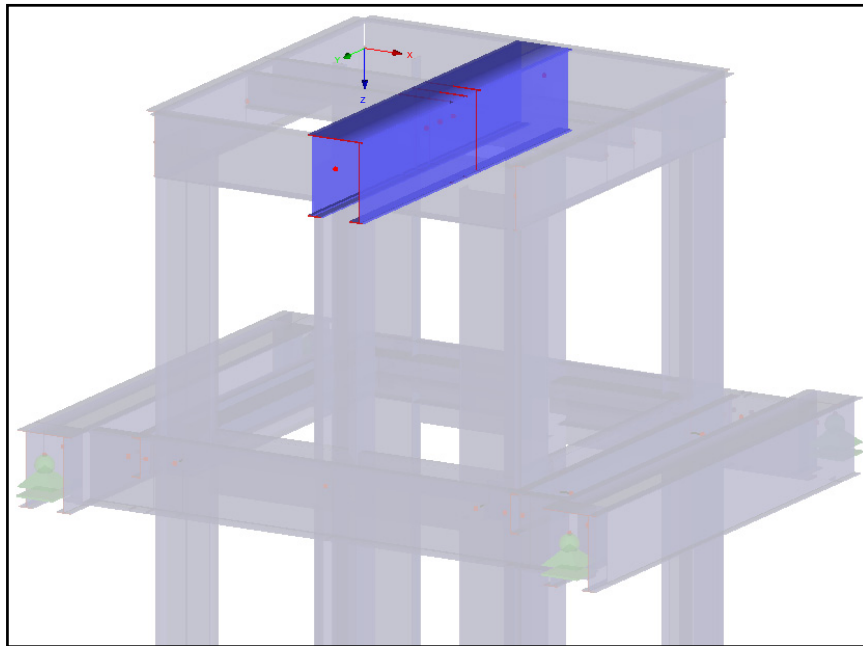


Abbildung 40: Selektion Querschnitt 5 (Mittelträger)

Aufgrund der Havarie (Überfahren der Endschalter) wurde der Mittelträger des oberen Katzgerüsts stark beschädigt.

Die Beschädigungen sind in erster Linie plastische Verformungen, die sich über bestimmte Bereiche des Querschnittes ausstrecken. Dabei wurde stellenweise die ursprüngliche Querschnittshöhe um ca. 50% herabgesetzt (Abbildung 42).

Bisher blieb ein Versagen des Bauteils aus. Die Begründung hierfür liegt voraussichtlich in der Spannungsverteilung im Träger. Eine rechnerische Untersuchung soll darüber Aufschluss geben. (Abschnitt 9.1)

Betrachtet man das statische System als Zweistützträger, so befindet sich die Hauptbelastung in der Trägermitte. Für eine detaillierte Auskunft über die Auslastung der einzelnen Restquerschnitte wird der Träger in Längsrichtung unterteilt, à 20cm.

Mit Hilfe des Stabwerkprogramms RSTAB werden die zugehörigen Schnittgrößen an jeder Stelle ermittelt. Anhand der zulässigen Spannung von 16 kN/cm^2 (DIN 15018, Tab. 10 [3]) wird für jede Stelle ein Widerstandsmoment berechnet, welches mindestens erreicht werden muss, damit der Querschnitt nicht versagt. Dies wird überprüft, indem die Restquerschnittshöhen vor Ort vermessen werden, die zugehörigen Widerstandsgrößen ermittelt und mit den oben genannten verglichen werden.

Abbildung 41 zeigt den Mittelträger im Originalzustand. Er besitzt über eine Länge von 3,93m eine Querschnittshöhe von 800mm und ein Widerstandsmoment W_y von 5482cm^3 (Anhang C).

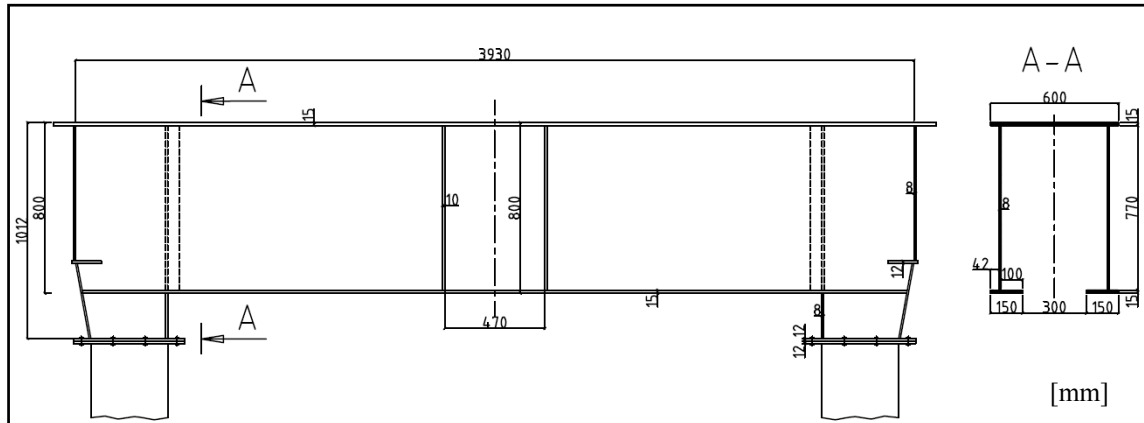


Abbildung 41: Mittelträger (QS5) vor der „Havarie“

In Abbildung 42 sind die bleibenden Verformungen dargestellt, die durch die Havarie entstanden sind. Die verbliebenden Höhen des verformten Mittelträgers wurden vor Ort vermessen.

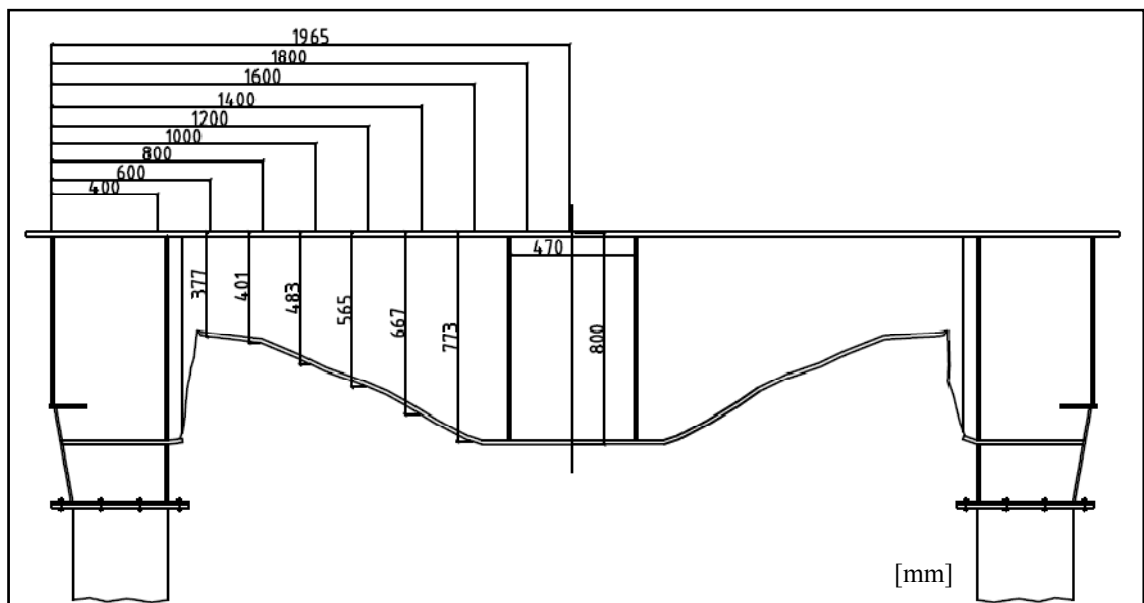


Abbildung 42: Mittelträger (QS5) nach der „Havarie“

9.1 Bestimmung des maßgebenden Lastfalls für Querschnitt 5

Der maßgebende Lastfall für den Querschnitt 5 am oberen Katzgerüst ist die Lastgruppe LG2. Berücksichtigt wird darin die Hublast P (Abschnitt 5.2.3) mit zugehörigem Hublastbeiwert ψ (Abschnitt 5.1.4.2).

$$LG2 = \psi \cdot LF3$$

Der Mittelträger wird somit überwiegend auf Biegung beansprucht. Anhand des Momentenverlaufs (Abbildung 43) wird deutlich, warum der Träger bisher noch nicht komplett versagt hat. In der Mitte des Trägers ist das Biegemoment am größten, jedoch der Querschnitt noch intakt und weiterhin fähig dies aufzunehmen. Im Randbereich ist die Querschnittshöhe geringer als in Trägermitte, damit auch die Widerstandsgröße (W_y), allerdings ist gleichzeitig auch eine geringere Spannung zu verbuchen, da die Schnittgröße M_y zum Auflagerbereich hin abnimmt.

9.2 Widerstandsmomente für unterschiedliche Querschnittshöhe h_i

Mit Hilfe des RSTAB-Zusatzmoduls DynQ7 wurden für folgende Querschnittshöhen die Widerstandsmomente ermittelt (Tabelle 22). Sie dienen als Anhaltspunkt für den Vergleich mit den vorhandenen Höhen in Abbildung 42 und Tabelle 23.

Tabelle 22: Querschnittshöhe h_i mit zugehörigem Widerstandsmoment $W_{y,i}$; (Anhang B)

h_i [mm]	$W_{y,i}$ [cm ³]
200,00	888,34
250,00	1181,60
300,00	1492,36
350,00	1820,07
400,00	2164,34
450,00	2524,81
500,00	2901,20
550,00	3293,28
600,00	3700,82
650,00	4123,64
700,00	4561,57
750,00	5014,47
800,00	5482,21

9.3 Biegemomente und Widerstandsmomente für Stellen x_i

Aus symmetrieähnlichen Gründen, wird nur die linke Hälfte des Trägers betrachtet: Von $x=0,4\text{m}$ bis $x=1,965\text{m}$ (Abbildung 42). Das aus der zulässigen Spannung zugehörige Widerstandsmoment wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_{zul} = 16 \frac{kN}{cm^2}^4$$

$$W_{erf,i} = \frac{M_{y,i}}{\sigma_{zul}}$$

$$W_{erf,(x=0,4)} = \frac{M_{y,(x=0,4)}}{\sigma_{zul}} = \frac{119,76 kNm \cdot 100}{16 \frac{kN}{cm^2}} = 748,50 cm^3$$

Tabelle 23: Schnittgrößen und Widerstandsgrößen QS5, LG2

Stelle x_i [m]	Biegemoment $M_{y,i}$ [kNm]	Widerstandsmoment $W_{erf,i}$ [cm ³]	erforderliche Höhe h_{erf} [mm]	vorhandene Höhe h_{vorh} [mm]
0,400	119,76	748,50	200,00	800,00
0,600	179,65	1122,81	250,00	377,00
0,800	239,53	1479,06	300,00	401,00
1,000	299,41	1871,31	350,00	483,00
1,200	359,29	2245,56	450,00	565,00
1,400	419,18	2619,88	500,00	667,00
1,600	479,06	2994,13	550,00	773,00
1,800	542,95	3393,44	600,00	800,00
1,965	599,99	3749,94	650,00	800,00

In Tabelle 23 sind das vorhandene Biegemoment M_y aus Lastgruppe 2 (Anhang B), das erforderliche Widerstandsmoment W_{erf} (Anhang B), die erforderliche Höhe h_{erf} (Tabelle 22) und die vorhandene Höhe h_{vorh} aufgelistet.

Vergleicht man die beiden letzten Spalten miteinander ist zu erkennen, dass an jeder Stelle x_i die erforderliche Mindesthöhe h_{erf} am Mittelträger vorliegt.

⁴ DIN 15018, Tab.10 [3]

Die Belastung wird somit über die Restquerschnitte aufgenommen. Dies wird allerdings nur gewährleistet, so lange der Mittelträger (QS5) diese Restquerschnittshöhen behält. Eine erneute Abminderung des Querschnitts führt dann mit großer Wahrscheinlichkeit zum Versagen.

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse aus Tabelle 23 grafisch dargestellt.

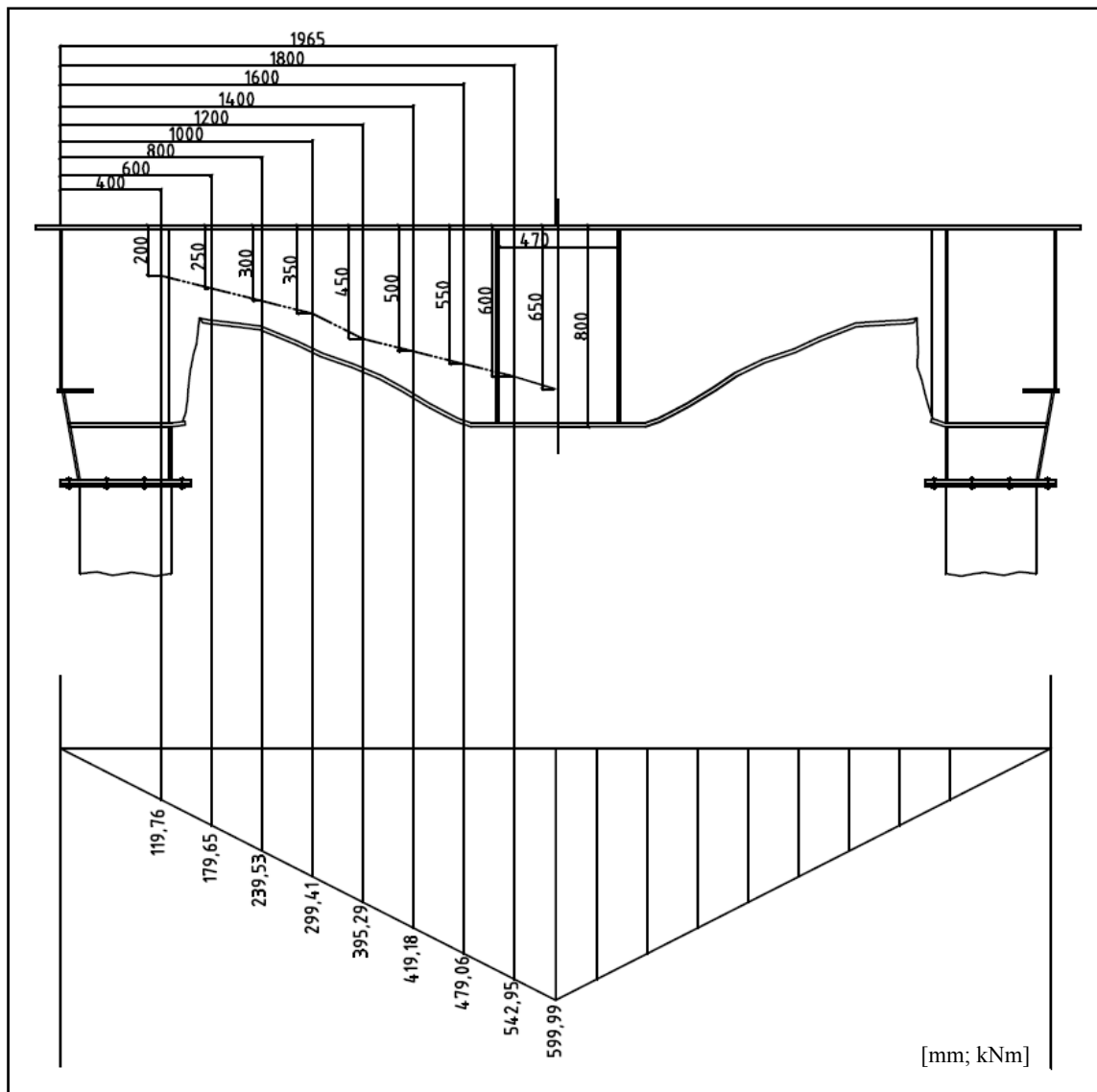
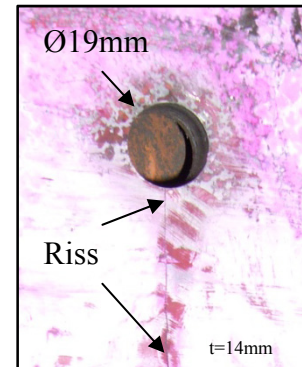


Abbildung 43: Biegemomentenverlauf QS5, LG2 und Mindesthöhen des Restquerschnittes

10 Reparaturtechnologie I (Katzrahmen)

Die Rissposition 1 (Abbildung 7) wurde bereits reparaturgeschweißt. Es ist erneut ein Riss entstanden, der durch die gesamte Schweißnaht verläuft. Nach Abschnitt 3.1.1.1, S.7, ist die Reparaturnaht mit einem „Überschweißen“ des Risses zu vergleichen. Es ist weder eine sichere Wurzelschweißung, noch eine entsprechende Nahtgeometrie umgesetzt worden.

Damit das Risswachstum vorläufig gestoppt werden kann, wird der Riss abgebohrt mit dem Ziel, die Kerbwirkung des Risses damit zu verringern. Die Bohrung erfolgte mit einem Kernlochbohrer (Ø19mm) und wurde anschließend entgratet damit keine neuen Kerben verbleiben und neue Risse verursachen können. Um das Rissende sicher zu erfassen, wurde der Riss vor dem Abbohren mit dem Farbeindringprüfverfahren behandelt (Abbildung 44).



**Abbildung 44: Riss
abgebohrt**

10.1 Reparaturvorschläge

Für die Sanierung der Risse am Katzrahmen wurden zunächst drei Reparaturvarianten erstellt. Dabei wurden Vor- und Nachteile bzgl. Arbeitsaufwand und Nutzungsdauer berücksichtigt.

10.1.1 Variante A

Die Variante mit dem geringsten Aufwand wäre ein Ausfugen des Risses mit Hilfe der Autogentechnik (Fugen), die Schnittkanten beschleifen sowie eine Nahtvorbereitung und anschließende Durchführung der Reparaturschweißung. Durch die eingeschränkte Zugänglichkeit ist hier eine einseitige Stumpfnah mit bleibender Schweißbadsicherung angebracht. Die Schweißverfahren Lichtbogenhandschweißen (111), Metallaktivgasschweißen mit Massivdraht (135) und das Metallaktivgasschweißen mit Fülldraht (136) können aufgrund der konstruktiven Situation angewendet werden.

Vorteil: Ein geringer Aufwand.

Nachteil: Der Riss wird dadurch zwar beseitigt, jedoch bleibt die Gefahr einer erneuten Rissbildung bestehen, da keine Verringerung der

Spannung gegeben ist und darüber hinaus die Kerbfallsituation durch die einseitige Schweißung verschärft wurde.

Fazit: Diese Variante ist keine Lösung auf Dauer und kann nur als Übergangslösung eingesetzt werden.

10.1.2 Variante B

Aufgrund der großen Schweißnahtbreite ist ein reines Ausfügen des Risses nicht zu empfehlen. Die Schadstelle wird jeweils 100mm links und rechts vom Riss und 50mm oberhalb des abgebohrten Rissendes entfernt. Dies geschieht ebenfalls mittels der Autogentechnik.

Der zu reparierende Querschnitt ist ein gewalztes U-Profil (U-400) welches in den 60er Jahren hergestellt wurde. Es ist davon auszugehen, dass dieses Walzprofil Seigerungszone im Bereich der Walzradien besitzt. Sie wirken sich negativ auf den Schweißprozess aus. Um dies zu vermeiden und gleichzeitig beim Einsetzen eines Neuteils nur wenige Quernähte zu produzieren, wird ein sogenanntes kupiertes U-Profil eingesetzt (Abbildung 48). Die Schweißnahtvorbereitung und Schweißausführung werden wie in Variante A beschrieben durchgeführt.

Vorteil: Geringer Aufwand gegenüber den folgenden Varianten. Der Riss wird durch Einsatz eines Neuteils vollständig entfernt. D.h. die Nahtvorbereitungen für die Stumpfnähte können präziser durchgeführt werden. Der Einsatz eines kupierten U-Profils ermöglicht ein „sauberes“ Schweißen außerhalb des oberen Walzradius und somit außerhalb der Seigerungszone.

Nachteil: Der Aufwand ist durch Einsatz eines kupierten Walzprofils größer als in Variante A. Der Querschnitt wird nicht verstärkt. Des Weiteren wird der Kerbfall durch die Reparaturschweißung verschärft.

Fazit: Diese Variante ist somit auch keine Lösung auf Dauer. Allerdings eine gute Alternative zur Variante A.

10.1.3 Variante C

Man geht zunächst wie in Variante B beschrieben vor. Zusätzlich wird ein Verstärkungsblech eingesetzt, um die vorhandenen Spannungen zu minimieren und so das Rissrisiko herabzusetzen. Das Verstärkungsblech wird wie in Abbildung 45 angeordnet. Es dient zur Versteifung des Querschnittes im gefährdeten Bereich.

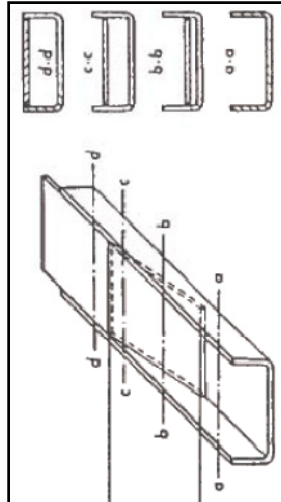


Abbildung 45: Erhöhung der Torsionssteifigkeit

- | | |
|-----------|--|
| Vorteil: | Der Querschnitt wurde verstärkt, indem die Torsionssteifigkeit erhöht wurde. |
| Nachteil: | Der Fertigungsaufwand wird größer, da zusätzlich Bleche zugeschnitten und anschließend vor Ort eingepasst werden müssen. Der Schweißaufwand ist ebenfalls größer. |
| Fazit: | Diese Variante ist aufwendiger als die zuvor genannten. Bei fachgerechter Ausführung verspricht sie jedoch eine längere Restnutzungsdauer für das Bauteil. Aufwand und Nutzen sollten dabei verstärkt betrachtet werden. |

10.2 Sanierung der Risse am Katzrahmen

In den folgenden Abschnitten werden der Reparaturablauf der Rissanierung des Katzrahmens sowie Abbildungen der Reparturnähte vor Ort und das Schweißnahtnach-

behandlungsverfahren HiFIT vorgestellt. Die Reparaturschweißungen werden nach Variante A und B durchgeführt, wobei letztere nur für die Sanierung der Rissposition 1 verwendet wird.

10.2.1 Reparaturablauf

Bevor der Kran stillgelegt wird, werden beide Traversen in die unterste Stellung gefahren, so dass der C-Haken (Dornpratze) am Boden aufsetzt und somit ein Teil der Hublast nicht mehr in den Seilen hängt. Ein Entlasten des kompletten Katzrahmens ist aufgrund des kleinen Reparaturzeitfensters nicht möglich.

Die Winkelkonsolen mit M24 Passschrauben werden gelöst und entfernt. Dann werden die Risse ausgefügt und die Nahtvorbereitung mittels Winkelschleifer für eine V-Naht hergestellt.

Mit geeigneten Keramikunterlagen wird eine Schweißbadsicherung sichergestellt. Sie ist notwendig bei einseitigen Schweißungen, bei denen die Wurzel, aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit, nicht gegearbeitet werden kann.

Bei der Sanierung der Rissposition 1 kommt keine Keramikunterlage zum Einsatz, hier wird auf Flacheisen zurückgegriffen, die angehalten und in der Schweißfuge geheftet werden (Abbildung 47). Anschließend wird ein kupiertes U-Profil (U-400) als Passstück eingesetzt, geheftet und verschweißt (Abbildung 48). Dabei werden erst die Quernähte und anschließend die Längsnähte ausgeführt, um so wenig wie möglich Verzug durch Schrumpfkkräfte zu erhalten.

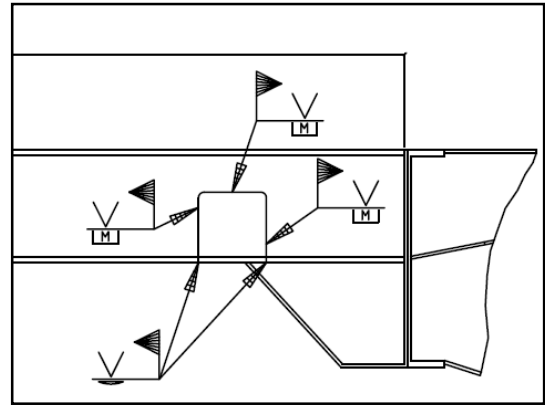


Abbildung 46: Schweißnahtübersicht für Pos.1

Geschweißt wird mit MAG Fülldraht (136). Der Drahtdurchmesser beträgt 1,2mm. Als aktives Schutzgas wird das Mischgas M21 (82% CO_2 + 18% Ar) verwendet. Es ist das am häufigsten eingesetzte Mischgas im Stahlbau, da es sich durch ein gutes Verhältnis zwischen Einbrand, Nahtoberfläche und Spritzerbildung auszeichnet. Die Schutzgasmenge pro Minute beträgt ca. 15l.

Der Schweißzusatzwerkstoff lautet nach DIN EN 17632 [16]: T 46 4 P M 1 H5

Dabei steht das T für „tube“, die 46 für eine Mindeststreckgrenze von 460N/mm², die 4 für eine Mindestkerbschlagarbeit von 47J bei -40°C, das P für eine rutilbasierte Füllung

mit schnell erstarrender Schlacke, das M für Mischgas, die 1 für alle Schweißpositionen und H5 für den diffusiblen Wasserstoffgehalt von $5\text{cm}^3/100\text{g}$ Schweißgut. Der Vorteil von Drähten mit schnell erstarrender Schlacke wird vor allem beim Schweißen in Zwangspositionen genutzt.

Nach der Schweißung werden alle Schweißspritzer entfernt sowie starke Nahtüberhöhungen eben geschliffen.

Eine Schweißnahtnachbehandlung erfolgt mit dem Verfahren „HiFIT“, welches im Abschnitt 10.2.3 vorgestellt und erläutert wird.

Am Ende der Reparatur werden alle Winkelkonsolen mit neuen Schrauben, Scheiben und Muttern versehen und fachgerecht angezogen.

Nach Rückbau des Gerüsts und Freigabe des Krans durch den Kranbetrieb konnte der Kran wieder eingesetzt werden.

10.2.2 Abbildungen der Reparaturschweißungen von Pos.1 und Pos. 2



Abbildung 47: Pos.1, Nahtvorbereitung



Abbildung 48: Pos.1, reparaturgeschweißt



Abbildung 49: Pos.2, Riss ausgefugt



Abbildung 50: Pos.2, reparaturgeschweißt

10.2.3 Schweißnahtnachbehandlung „HiFIT“

Zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit gibt es heute verschiedene technologische Maßnahmen für die Schweißnahtnachbehandlung. Sie lassen sich in zwei Gruppen einteilen: In der einen liegt der Schwerpunkt in der Nahtprofilverbesserung, welche sich unterteilt in: „mechanische Bearbeitung“ und „wiederaufschmelzen der Nahttränder“. In der anderen Gruppe werden Eigenspannungen eingebracht bzw. abgebaut. Hier wird noch einmal unterschieden: in mechanisierte Verfahren und thermische Verfahren (Abbildung 51). Die angewendeten Verfahren sind fettgedruckt dargestellt.

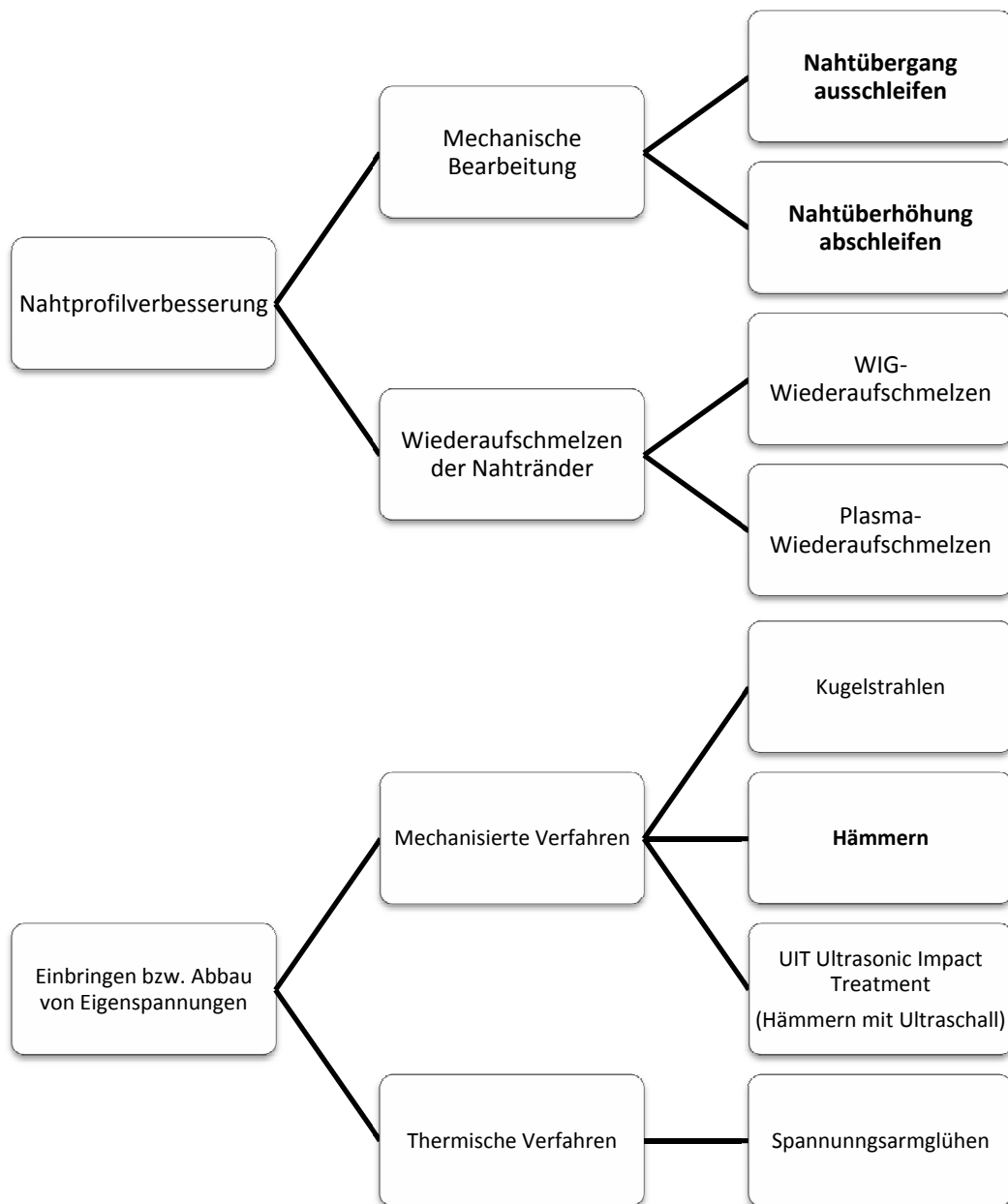


Abbildung 51: technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit; [13]

Als Schweißnahtnachbehandlung wird das hochfrequentes Hämmerverfahren (HiFIT⁵) eingesetzt. Das pistolenähnliche Gerät besitzt einen gehärteten Bolzenstift mit definiertem Radius, der mittels Druckluft 200-mal pro Sekunde auf den Nahtübergangsbereich trifft. Dabei werden Druckspannungen in den oberflächennahen Bereich induziert und gleichzeitig der Kerbradius ausgerundet.

Vor der Anwendung muss die Schlagintensität, abhängig vom Werkstoff und Luftdruck, eingestellt werden. Die Einstellungen sind anhand einer Probe zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Der Anstellwinkel des Bolzens zum Grundwerkstoff sollte im Bereich von 60° bis 80° liegen und 70° bis 90° in Vorschubrichtung (Abbildung 52). [14]

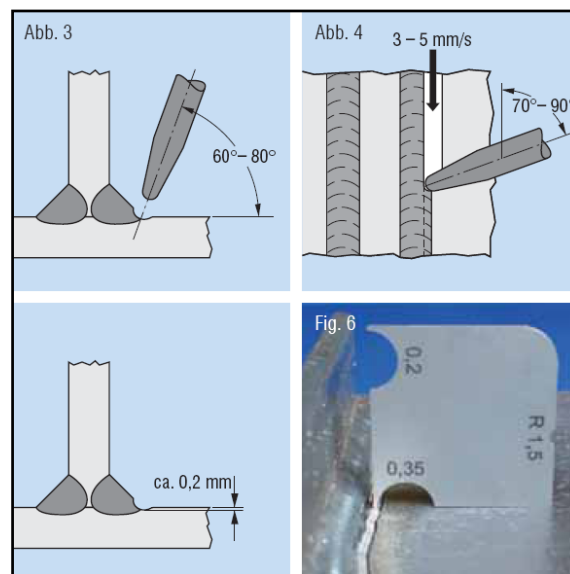


Abbildung 52: Parameter HiFIT; [14]

Abbildung 53 zeigt das Prinzip des HiFIT Hämmerprozesses und Abbildung 54 die Anwendung bei der Reparaturschweißung von Position 1 am Katzrahmen.

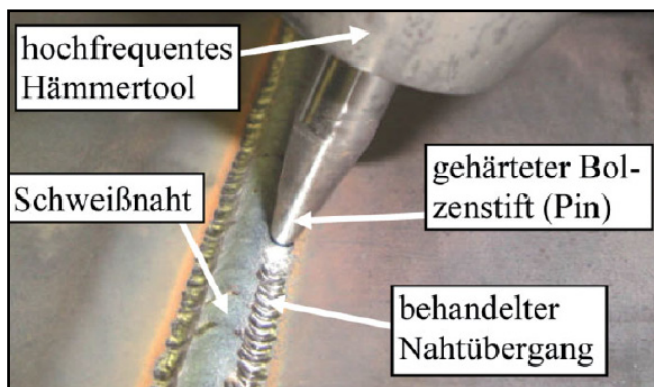


Abbildung 53: HiFIT Hämmerprozess; [14]

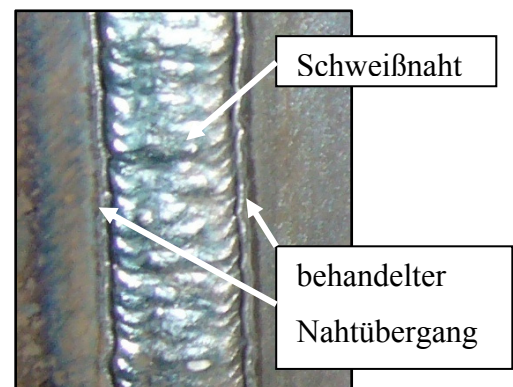


Abbildung 54: Schweißnahtnachbehandlung am QS 9 (U-400)

⁵ high frequency impact treatment

Die Bestimmung der Querschnittswerte für den Restquerschnitt QS5‘ erfolgen mit dem Zusatzmodul DynQ7 des Stabwerksprogramms RSTAB. (Tabelle 24)

Tabelle 24: Querschnittswerte für Restquerschnitt QS5‘ (h=350); (Anhang B)

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit
Querschnittsfläche	A	138,10	cm ²
Lage des Schwerpunktes	y _s	38,4	cm
	z _s	25,7	cm
Trägheitsmomente	I _y	24512,50	cm ⁴
	I _z	45645,20	cm ⁴
Querschnittsgewicht	G	108,41	kg/m
Widerstandsmomente	W _y	954,28	cm ³
	W _z	1189,47	cm ³

11.2.2 Reparaturlastfall für QS5‘

Eine Proberechnung hat ergeben, dass das Eigengewicht des Querschnittes vernachlässigt werden kann. Die Hubwerkslast setzt sich aus den Gewichtskräften der beiden Seiltrommeln mit Seilrollen und den drei Getrieben zusammen. Sie wird mit ca. 10,5t angesetzt und als Streckenlast auf den Mittelträger umgerechnet. Daraus ergibt sich folgende Streckenlast auf den Mittelträger.

$$g_{\text{Hubwerk}} = 10,5t \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \approx 105kN \quad p = \frac{105kN}{3,93m} = 26,7 \approx 27 \frac{kN}{m}$$

$$LF_{\text{Reparatur}} = \gamma_f \cdot p = 1,5 \cdot 27 \frac{kN}{cm^2}$$

11.2.3 Bestimmung des Biegemomentes für den Restquerschnitt QS5‘

Für die Bestimmung des vorhandenen Biegemomentes wird das statische System „Träger auf zwei Stützen“ verwendet (Abbildung 56).

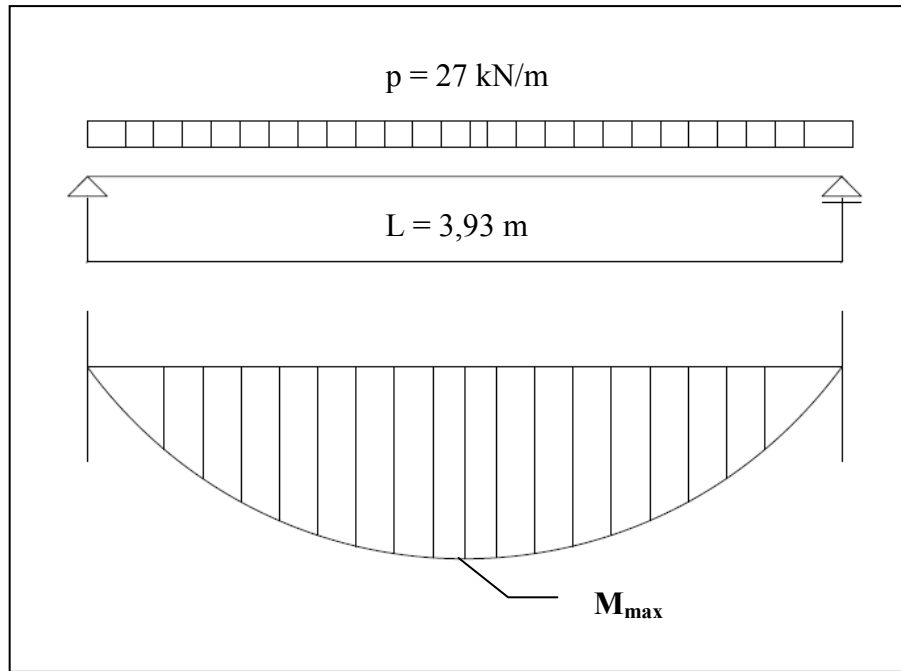


Abbildung 56: Biegemomentenverlauf des Reparaturlastfalls

Die Verkehrslast p wird nach DIN 18800 mit einem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_f = 1,5$ beaufschlagt.

$$\boxed{q_d = p \cdot \gamma_f} = 27 \frac{kN}{m} \cdot 1,5 = 40,50 \frac{kN}{m}$$

$$\boxed{M_{y,d} = \frac{q_d \cdot l^2}{8}} = \frac{40,50 \frac{kN}{m} \cdot (3,93m)^2}{8} = 78,19 kNm$$

$$W_{QS5'} = 954,28 cm^3 \text{ (Tabelle 24)}$$

11.2.4 Nachweis des Restquerschnitts QS5'

$$\boxed{\sigma_d = \frac{M_{y,d}}{W}} = \frac{78,19 kNm \cdot 100}{954,28 cm^3} = 8,20 \frac{kN}{cm^2} < 21,82 \frac{kN}{cm^2} = \boxed{\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}} = \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,1}$$

Der Nachweis ist erfüllt, es wird keine Unterstützung des Restquerschnittes QS5' benötigt. Dies gilt nur dann, wenn die Sanierung in der Reihenfolge, wie in Abschnitt 11.3 beschrieben, ausgeführt wird.

11.3 Reparatur des Stegblechbereiches

Die verformten Bleche werden mittels Autogentechnik ausgeschnitten, die Schnittkanten entsprechend der Nahtvorbereitung bearbeitet. Die neuen Bleche werden in der Werkstatt vorgefertigt. Zugeschnitten, gestrahlt und mit Fasen versehen zur Baustelle geliefert und anschließend eingepasst, ausgerichtet, geheftet und verschweißt.

11.3.1 Entfernen der verformten Stegbleche

Abbildung 57 zeigt den beschädigten Bereich, der mit dem autogenen Brennschneideverfahren herausgeschnitten wird. Dafür wird zunächst ein grober Schnitt im Abstand von ca. 50mm vom Rand durchgeführt. Gegebenenfalls werden aufgrund der Blechgröße mehrere Einzelteile herausgeschnitten. Mit dem zweiten Schnitt wird eine genaue Passung hergestellt. Unebenheiten an den Schnittkanten werden durch Schleifarbeiten nachbearbeitet.

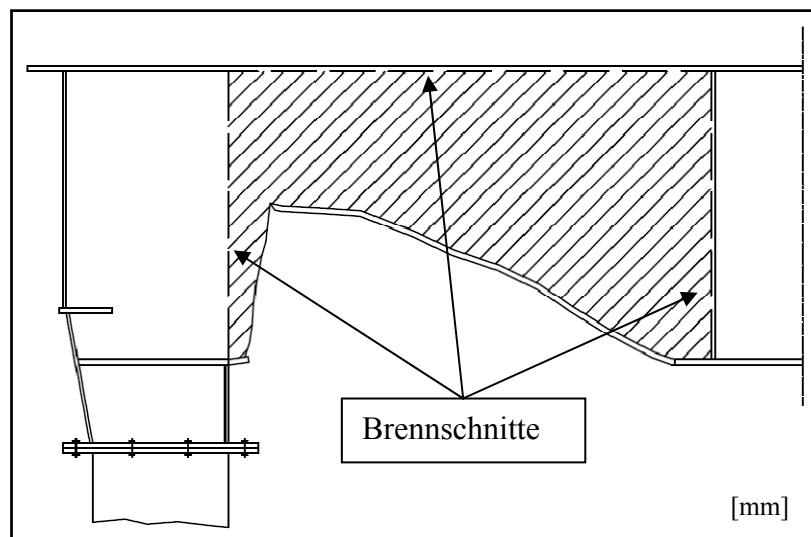


Abbildung 57: Brennschnitte am Mittelträger

11.3.2 Durchführung der Reparaturschweißungen

11.3.2.1 Schweißnahtfolge

Der Einsatz eines Schweißfolgeplans dient zur Minimierung von Schrumpfspannungen und somit zur Reduzierung des Verzugs während des Schweißprozesses.

Ziel ist es, dass sich die auftretenden Schrumpfungen durch eine geeignete Schweißreihenfolge weitestgehend ausgleichen. Folgende Regeln sollten dabei eingehalten werden: [12]

- Das Bauteil muss so lange wie möglich frei schrumpfen können.

- Es sollte symmetrisch von der Mitte aus nach außen geschweißt werden.
- Nähte, die auf das Bauteil versteifend wirken, sollten zuletzt geschweißt werden.
- Zuerst werden die Nähte geschweißt, die hoch (auf Zug) beansprucht werden.

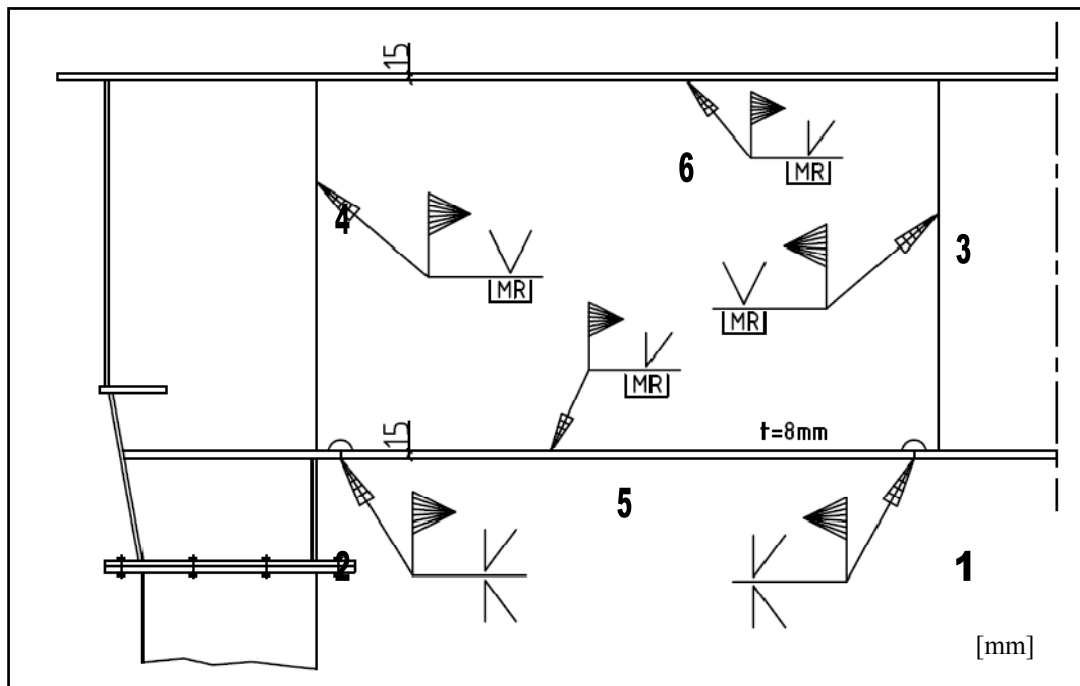


Abbildung 58: Reparaturschweißung der Stegbleche mit Schweißnahtfolge (1 bis 6)

11.3.2.2 Bestimmung der Schweißnahtarten und Schweißnahtvorbereitung

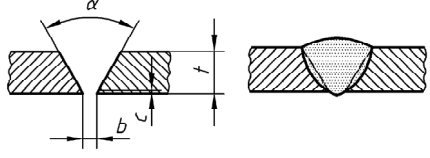
Bei der Sanierung des Mittelträgers, werden als erstes die Quernähte am Untergurtblech geschweißt. Die Freischnitte im Stegblech sorgen dafür, dass an diesen Stellen keine Nahtkreuzungen entstehen. Aufgrund der konstruktiven Lage werden Doppel-HV-Nähte vorgesehen mit entsprechender Nahtvorbereitung (Tabelle 25). Dabei werden die Fasen am neu eingesetzten Untergurtblech ausgeführt. Da es sich um eine beidseitige Naht handelt und das Bauteil nicht gewendet werden kann, muss dementsprechend in der Wannenposition (PA) und in der Überkopffposition (PE) geschweißt werden. Ein Schweißzusatzwerkstoff mit schnell erstarrender Schlacke begünstigt das Arbeiten in der Überkopffposition.

Tabelle 25: Schweißnahtvorbereitung der Doppel-HV-Naht; Quernähte 1+2;[27]

	$\beta = 40^\circ$ $c = 1\text{ mm}$	$b = 3\text{ mm}$ $t = 15$
--	---	-------------------------------

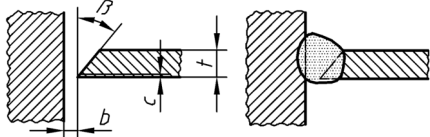
Als zweites werden die Vertikalnähte am Stegblech verschweißt. Die Bleche werden für eine V-Naht vorbereitet (Tabelle 26). Eine beidseitige Schweißung ist nicht möglich, deshalb wird mit einer Schweißbadsicherung aus Keramik gearbeitet. Sie wird an dem Stumpfstoß ausgerichtet und fixiert. Nach der Schweißung wird sie entfernt, damit z.B. eine Sichtprüfung erfolgen kann. Es wird in der steigenden Position (PF) geschweißt. Es empfiehlt sich wieder einen Zusatzwerkstoff mit schnell erstarrender Schlacke einzusetzen, um den Stützeffekt des Schweißbades durch die Schlacke gerade in Zwangspositionen zu nutzen.

Tabelle 26: Schweißnahtvorbereitung der V-Naht; Vertikalnähte 3+4; [27]

	$\alpha = 50^\circ$ $c = 1\text{mm}$	$b = 2\text{mm}$ $t = 8\text{mm}$
---	---	--------------------------------------

Zum Schluss werden die Längsnähte geschweißt. Hierbei werden HV-Nähte (Tabelle 27) gewählt, da die Zugänglichkeit für eine beidseitige Schweißung nicht gegeben ist. Die Schweißbadsicherung wird durch eine Keramikunterlage sichergestellt. Die untere Naht wird in der Position PB und die obere muss in der Zwangsposition PD ausgeführt werden. Für die letztere sind die Anforderungen an den Schweißer sowie an die Nahtvorbereitung höher zu stellen, um Schweißnahtfehler so gering wie möglich zu halten.

Tabelle 27: Schweißnahtvorbereitung der HV-Naht; Längsnähte 5+6; [27]

	$\beta = 45^\circ$ $c = 1\text{mm}$	$b = 2\text{mm}$ $t = 8\text{mm}$
---	--	--------------------------------------

11.4 Reparatur der Montagestöße / Kopfplattenstöße:

Die Sanierung der Montagestöße / Kopfplattenstöße wird in vier Arbeitsabschnitte gegliedert: Schritt I, II, III und IV.

Schritt III+IV: (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und Abbildung 62: Schritt IV)

Das neue Zwischenstück wird in der Werkstatt vorgefertigt. Auf diese Weise können Zwangspositionen (PF, PD) beim Schweißen durch Drehen des Bauteils vermieden werden und in der bevorzugten Wannen- oder Horizontalposition (PA, PB). Der Originalstoß bestand aus zwei 12mm starken Kopfplatten mit einem Kreisausschnitt von 260mm und Bohrungen für M24 Passschrauben. Um den Arbeitsaufwand so gering wie nötig zu gestalten, wird anstelle von zwei Kopfplatten eine 25mm starke Platte eingesetzt. Der Montagestoß in der früheren Form wird nicht mehr benötigt.

Der Kopfplattenstoß wird überwiegend auf Druck beansprucht und bedarf daher keiner Z-Güten-Auswahl.

Als Schweißverfahren kommen das Lichtbogenhandschweißverfahren (111) und das Metallaktivgasschweißverfahren (135 bzw. 136) in Frage. Die Wahl des Zusatzwerkstoffes richtet sich in der Regel nach dem Grundwerkstoff der zu fügenden Bauteile, nach der Beanspruchung und der Schweißposition. Die Nähte, die auf der Baustelle geschweißt werden müssen, sollten mit einem basischen Zusatzwerkstoff ausgeführt werden. Der Vorteil hierin liegt in der guten Zähigkeit des Schweißgutes und der hohen Rissicherheit. Außerdem werden unerwünschte Stahlbegleiter, wie Phosphor (P), Schwefel (S) und Stickstoff (N₂), abgebunden und über die Schlacke abgeführt.

Ein Beispiel für einen geeigneten Schweißzusatzwerkstoff für das Verfahren E-Hand, für unlegierte Stähle (S235) ist nach DIN EN 2560-A die folgende Bezeichnung:

E 42 4 B 42 H5

Dabei steht das E für das Schweißverfahren, Lichtbogenhandschweißen; die 46 für eine Mindeststreckgrenze des Schweißgutes von 460N/mm²; die 4 für eine Mindestkerbschlagarbeit von 47J bei -40°C Prüftemperatur; das B für den basischen Umhüllungstyp; die 4 für die Stromart (= Gleichstrom); die 2 für alle Schweißpositionen außer „fallend“ (PG); H5 steht für den maximalen Wasserstoffgehalt von 5ml pro 100g Schweißgut.

Die Wahl der Schweißnahtart richtet sich unter anderem nach der Beanspruchung des Bauteils, der Werkstückdicke, dem Schweißverfahren und der Zugänglichkeit. Letztere ist ausschlaggebend für die unterschiedlichen Nahtarten am Kopfplattenstoß (Abbildung 62: Schritt IV).

Für die Verbindung Kopfplatte mit Passstück wird aufgrund der Möglichkeit, beidseitig

schweißen zu können, eine Doppelkehlnaht verwendet.

Oberhalb der Kopfplatte ist die Zugänglichkeit von innen schwieriger, hier wird eine HV-Naht mit Badsicherung verwendet, da ein Gegenschweißen nicht möglich ist.

Der Stumpfstoß zwischen neuem Passstück und alter Stütze ist beidseitig zugänglich und wird mit einer V-Naht mit Gegenlage verschweißt.

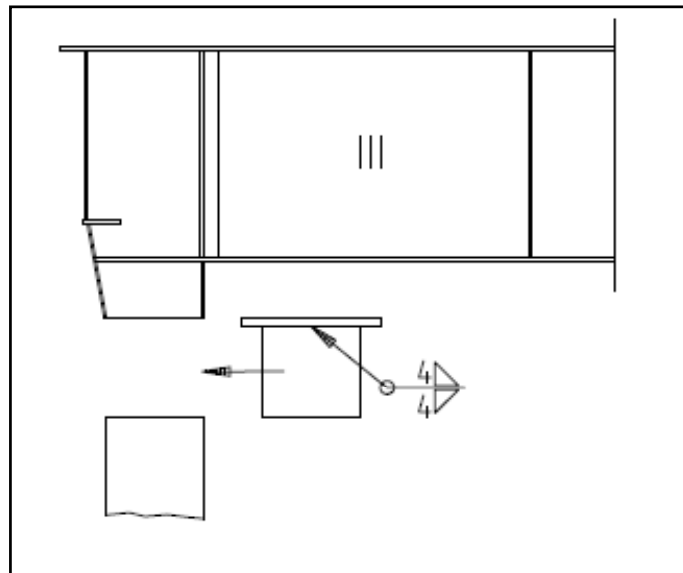


Abbildung 61: Schritt III

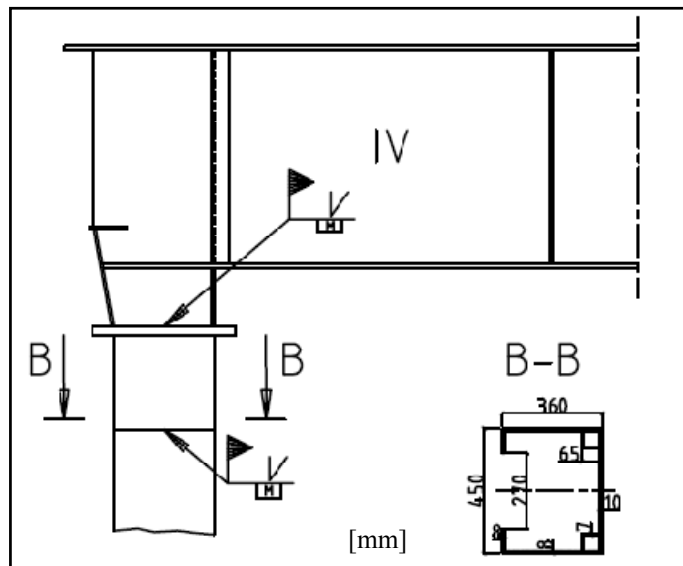


Abbildung 62: Schritt IV

12 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Verlängerung der Nutzungsdauer des Krans fielen zwei Schadensfeststellungen besonders ins Gewicht: Schadensfeststellung I und Schadensfeststellung II.

Die *Risserscheinungen am Katzrahmen*, Schadensfeststellung I, sind mit dem Erreichen des Ermüdungswiderstandes des Materials zu begründen. Dies wird durch die Untersuchung nach DIN EN 1993-1-9 belegt: Der Ermüdungsnachweis wurde für die bisherige Nutzungsdauer von 47 Jahren nicht erfüllt (Abschnitt 7.3).

In der *Werkstoffanalyse* für den Mittelträger (U-400) des Katzrahmens fielen zeilenförmig ausgebildete Mangansulfide im Werkstoffgefüge auf. Sie scheiden jedoch als Hauptursache für die Rissbildungen aus, da keine Belastung senkrecht zur Walzrichtung festgestellt werden konnte.

Die *Reparaturschweißungen der Risse am Katzrahmen* wurden ausreichend bemessen. Dies ergab die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit nach DIN EN 1993-1-9, welche für die Restnutzungsdauer von vier Jahren ausgelegt wurde (Abschnitt 7.3.6.4). Es wird jedoch empfohlen die vier Jahre nicht voll auszureizen. Die beiden Schadensfeststellungen, die in dieser Arbeit verstärkt untersucht wurden sind zwar die umfangreichsten, allerdings nicht die einzigen an diesem Kran.

Die *Beschädigung des oberen Katzgerüsts*, Schadensfeststellung II, ist durch das Versagen des Endschalersystems seitens des Hubwerkes zu begründen. Der Mittelträger sowie die Montagestöße sind stark plastisch verformt worden. Nach rechnerischer Betrachtung (Abschnitt 9) ist die Lastverteilung am Mittelträger (QS5) ein Grund, weshalb ein Versagen bisher ausblieb. Gleichzeitig ist die aktuelle Lage als bedenklich einzustufen, solange die Endschalterproblematik nicht gelöst ist.

Die *Sanierung des oberen Katzgerüsts*, resultierend aus der Schadensfeststellung II, sollte aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht werden, da der Kran voraussichtlich schon in 2 Jahren stillgelegt wird und durch einen neuen Zweiträger-Brückenkran ersetzt wird.

Aufgrund der Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen des Mittelträgers wird eine zeitnahe Sanierung empfohlen, da man nicht sicher gehen kann, dass so eine Beschädigung sich nicht wiederholt.

Es sollte zumindest der *Umbau des Endschaltersystems* auf ein Kopierwerk umgesetzt werden, da ein weiterer Ausfall der Endschalter von der aktuellen Katzgerüstkonstruktion nicht ein zweites Mal kompensiert wird. Dies würde zum Ausfall des gesamten Hubwerkes und letztendlich damit zum Ausfall des ganzen Krans führen. Durch den Einsatz eines Kopierwerkes und der damit sichereren Endabschaltung kann dieses Risiko minimiert werden. Bei einem baugleichen Kran aus der Nachbarhalle, wird dieses System (Kopierwerk) bereits erfolgreich eingesetzt.

Der Einsatz zweier Krannormen, die zurzeit beide gültig sind, ermöglichte eine *Normengegenüberstellung* zwischen der DIN 15018 und der DIN EN 13001-2 (Abschnitt 8). Ein direkter Vergleich hat sich aufgrund der unterschiedlichen Berechnungskonzepte nicht als aussagefähig erwiesen. Die Lastannahmen, bezogen auf die Ermüdungsfestigkeitsberechnung beider Normen, fielen nahezu identisch aus. Dagegen gab es bei der Nachweisführung große Unterschiede. Die Ursache hierfür liegt meiner Meinung nach darin, dass die Normen nicht in ihrer kompletten Bandbreite gegenübergestellt wurden. Die Krannormen sind für eine gesamte Berechnung von Krananlagen ausgelegt, d.h. für Spannungsnachweise, Stabilitätsnachweise, Gebrauchstauglichkeitsnachweise usw. In dieser Diplomarbeit wurde jedoch nur ein ausgewählter Bereich des Krans auf Ermüdung untersucht und damit ein Teilbereich der Normen genutzt.

Bezogen auf die Gegenüberstellung der Lastannahmen, hätte man aufgrund der unterschiedlichen Berechnungskonzepte auch unterschiedliche Ergebnisse erwarten können. Besonders durch den Einsatz der Teilsicherheitsbeiwerte in der DIN EN 13001-2 gegenüber den zulässigen Spannungen in der DIN 15018.

Da die Lastannahmen, jedoch in Bezug auf die Ermüdung betrachtet wurden, dadurch die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 13001-2 auf „eins“ gesetzt werden, fiel der Vergleich mit nur geringen Unterschieden aus.

Die Betrachtung beider Normen ist dennoch sinnvoll gewesen, da in naher Zukunft eine Ablösung der DIN 15018 durch die DIN EN 13001 erfolgen wird. Es fand somit ein erstes Herantasten an die neue Krannorm statt.

Bei der Sanierung des Katzrahmens wurde erstmalig eine Schweißnahtnachbehandlung mit *hochfrequenten Hämmerverfahren* eingesetzt. Das Hauptziel war eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit eines dynamisch beanspruchten Bauteils, welches mittels

einer Reparaturschweißung instandgesetzt wurde.

Durch den immer häufiger werdenden Einsatz in den verschiedenen Bereichen des Stahlbaus und Maschinenbaus und die gleichzeitig relativ einfache Handhabung, wird dieses Verfahren zukünftig verstärkten Einsatz in der Instandhaltung seitens des Kranbetriebes finden.

Fazit:

Der Zweiträger-Brückenkran 7 ist aufgrund seiner langen Laufzeit von 47 Jahren und diversen Schäden, vor allem an der Laufkatze, außer Betrieb zu nehmen und durch einen neuen Kran zu ersetzen. Nach aktuellstem Stand wird dies in ca. zwei Jahren in die Tat umgesetzt werden, da der neue Kran 66 vor kurzem bestellt wurde.

13 Literatur

- [1] Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung der Europäischen DIN EN 1993-1-9:2005 + Ber 1: 2009-12
- [2] Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Deutsche Fassung EN 1991-3:2006
- [3] Norm DIN 15018 Teil1:1984-11: Krane: Grundsätze für Stahlbautragwerke Berechnung
- [4] Norm DIN 15018 Teil 2:1984-11: Krane: Stahltragwerke: Grundsätze für die bauliche Durchbildung und Ausführung
- [5] Norm DIN EN 13001 Teil 1: 2004+A1:2009: Krane – Konstruktion allgemein – Teil1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen
- [6] Norm DIN EN 13001 Teil 2: 2004+A3:2009: Krane – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen;
- [7] VDI Richtlinien: Krane in Gebäuden; Planungsgrundlagen; VDI 2388:2007-10
- [8] VDI Richtlinien: Instandsetzung von Krananlagen; Schweißen – Heften – Brennschneiden – Bohren; VDI 2382:1990-08
- [9] VDI Richtlinien: Instandhaltung von Krananlagen; VDI 2485:2009-08
- [10] Prüfbuch Kran7 (D1), Warmwalzwerk 3, Halle D: SZST Salzgitter Service und Technik GmbH
- [11] Dr. –Ing.habil. J. Schuster; 2008 Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH; Werkstoffe und ihr Verhalten beim Schweißen: Rissbildung bei Stählen; Kapitel 2.11 (S.1-18)
- [12] Dr. Zwickert; 2008 Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH; Fertigung und Anwendungstechnik: Verformungen und Spannungen beim Schweißen; Kapitel 4.03 (S. 1-33)
- [13] Dipl.-Ing. Kranz; 2008 GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH: Konstruktion und Gestaltung: Verhalten geschweißter Verbindungen bei dynamischer Beanspruchung: Kapitel 3.07 (S. 1-20)
- [14] P.Schaumann / C. Keindorf; Stahlbau 79 (2010) Heft 1: Numerische Schweißsimulation mit anschließendem Hämmerprozess; (S.34-45)
- [15] Prof. Dr.-Ing. P.Hübner; Vorlesungsskript: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen: 2008-06 (S. 1-31)

- [16] Norm DIN EN ISO 17632:2008-08: Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung
- [17] K.-J. Schneider: Bautabellen für Ingenieure, 17. Auflage. Neuwied: Werner Verlag. (2006)
- [18] C. Seeßelberg: Kranbahnen Bemessung und Konstruktive Gestaltung, 3. Auflage; Berlin: Bauwerk Verlag GmbH (2009)
- [19] H.-J. Bargel/G. Schulze: (2000); Werkstoffkunde, 7. Auflage; Berlin: Springer Verlag.
- [20] A. Herbert Fritz / G. Schulze: Fertigungstechnik, 5.Auflage; Berlin: Springer Verlag. (2001)
- [21] Bormann: Werkstoff- und Prozessentwicklung / Salzgitter; Salzgitter Mannesmann Forschung: Untersuchungsnummer: M_0200_10 (Schliffbilder Probe 1: Walzwerk III, Halle D, Kran 7 (D1), Hubgerüst Ecke Süd-West)
- [22] Dr. Frank Kleppe: Chemisches Labor; Salzgitter Flachstahl GmbH; Werkstoffanalyse: Probe1, Walzwerk III, Halle D, Kran 7 (D1), Hubgerüst Ecke Süd-West; IDENT (RB.22011.Kran7.01); EDATUM (22.01.2010, 08:08:57)
- [23] DIN DVS Taschenbuch 191: Schweißtechnik 4, Auswahl von Normen für die Ausbildung des schweißtechnischen Personals; 8. Auflage; 2006
- [24] Getriebe-Nocken-Endschaltersystem:
http://www.wachendorffautomation.de/fileserver/anwendungsbericht_de/WA0501.pdf
- [25] VDI Richtlinien: VDI2388:2007-10: Krane in Gebäuden, Planungsgrundlagen
- [26] Norm DIN 18800-1:2008-11: Stahlbauten – Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [27] Norm DIN EN ISO 9692-1:2004-05: Schweißen und verwandte Prozesse – Empfehlungen zur Schweißnahtvorbereitung – Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen [...] von Stählen (ISO 9629-1:2003)

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zweitträger-Brückenkran 7, max. Nutzlast 32t	2
Abbildung 2: Dornkran im Einsatz	2
Abbildung 3: Dispositionszeichnung des Kran (Vorderansicht)	3
Abbildung 4: Einstufenbelastung [15]	4
Abbildung 5: Mehrstufenbelastung [15]	4
Abbildung 6: Überblick über die Positionen der Schadensfeststellungen I+II	5
Abbildung 7: Übersicht der Risspositionen am Katzrahmen; Pos.1 bis Pos.4	6
Abbildung 8: Pos. 1	7
Abbildung 9: Pos. 2	7
Abbildung 10: Pos. 3	7
Abbildung 11: Position der Bruchstelle	8
Abbildung 12: Ansicht der Bruchstelle	8
Abbildung 13: Position der Probenentnahme am Katzrahmen	9
Abbildung 14: Schliff ungeätzt; 100:1, [21]	10
Abbildung 15: Schliff geätzt HNO ₃ ; 100:1, [21]	10
Abbildung 16: geätzt HNO ₃ ; 500:1; KG:7, [21]	10
Abbildung 17: Ansicht Mittelträger (QS9)	11
Abbildung 18: Ansicht Süd-West-Seite	12
Abbildung 19: Ansicht West-Seite	12
Abbildung 20: Ansicht Süd-Ost-Seite	12
Abbildung 21: Ansicht Süd-West-Seite	12
Abbildung 22: Endschalter Hubwerk	12
Abbildung 23: montiertes Kopierwerk an Seiltrommel	13
Abbildung 24: Zweischienenlaufkatze des Kran 7	14
Abbildung 25: Beispiel eines Flaschenkrans [25]	14
Abbildung 26: Ansicht der Laufkatze mit Detailansicht auf die beiden Traversen	15
Abbildung 27: RSTAB-3D-Modell der Laufkatze mit den Querschnitten 1 bis 9	17
Abbildung 28: Strukturmodell der Laufkatze im RSTAB Modul	18
Abbildung 29: Winkelverbindungen Schachtgerüst – Katzrahmen	19
Abbildung 30: Auflagersituation des Katzrahmens	20
Abbildung 31: Kopplungsstäbe für Traversen und Dornsäule	20
Abbildung 32: Schwerpunktlagen Laufkatze	26
Abbildung 33: Selektion QS 9 (U-400)	35

Abbildung 34: FA1 Stab Nr. 110, x: 0,730m.....	36
Abbildung 35: FA2 Stab Nr. 110, x: 0,730m.....	36
Abbildung 36: FA11, Stab Nr. 110, x: 0,730m.....	37
Abbildung 37: FA16, Stab Nr. 110, x: 0,730m.....	37
Abbildung 38: Wöhlerlinien; FAT 80; $N=1,8 \cdot 10^7$; Laufzeit 47 Jahre; [15]	48
Abbildung 39: Wöhlerlinien; FAT 50; $N=1,5 \cdot 10^6$; Restlaufzeit 4 Jahre; [15]	49
Abbildung 40: Selektion Querschnitt 5 (Mittelträger).....	53
Abbildung 41: Mittelträger (QS5) vor der „Havarie“	54
Abbildung 42: Mittelträger (QS5) nach der „Havarie“	54
Abbildung 43: Biegemomentenverlauf QS5, LG2 und Mindesthöhen des Restquerschnittes	57
Abbildung 44: Riss	58
Abbildung 45: Erhöhung der Torsionssteifigkeit	60
Abbildung 46: Schweißnahtübersicht für Pos.1	61
Abbildung 47: Pos.1, Nahtvorbereitung	62
Abbildung 48: Pos.1, reparaturgeschweißt	62
Abbildung 49: Pos.2, Riss ausgefugt.....	62
Abbildung 50: Pos.2, reparaturgeschweißt	62
Abbildung 51: technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit; [13].....	63
Abbildung 52: Parameter HiFIT; [14]	64
Abbildung 53: HiFIT Hämmerprozess; [14]	64
Abbildung 54: Schweißnahtnachbe-handlung am QS 9 (U-400)	64
Abbildung 55: Restquerschnitt QS5‘ mit $h=350\text{mm}$	65
Abbildung 56: Biegemomentenverlauf des Reparaturlastfalls	67
Abbildung 57: Brennschnitte am Mittelträger	68
Abbildung 58: Reparaturschweißung der Stegbleche mit Schweißnahtfolge (1 bis 6) ..	69
Abbildung 59: Schritt I	71
Abbildung 60: Schritt II	71
Abbildung 61: Schritt III.....	73
Abbildung 62: Schritt IV	73
Abbildung 63: QS1 3D	100
Abbildung 64: Abmessungen QS 1 [mm].....	100
Abbildung 65: QS3 3D	101

Abbildung 66: Abmessungen QS 2 [mm].....	101
Abbildung 67: QS3 3D	102
Abbildung 68: Abmessungen QS 3 [mm].....	102
Abbildung 69: QS4 3D	103
Abbildung 70: Abmessungen QS 4 [mm].....	103
Abbildung 71: QS5 3D	104
Abbildung 72: Abmessungen QS 5 [mm].....	104
Abbildung 73: QS6 3D	105
Abbildung 74: Abmessungen QS 6 [mm].....	105
Abbildung 75: QS7 3D	106
Abbildung 76: Abmessungen QS 7 [mm].....	106
Abbildung 77: QS8 3D	107
Abbildung 78: AbmessungenQS 8 [mm].....	107
Abbildung 79: QS9 3D	108
Abbildung 80: Abmessungen QS 9 [mm].....	108

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Angaben Kran 7; [10]	3
Tabelle 2: Auswertung der chemischen Analyse [22]	10
Tabelle 3: technische Zeichnungen Kran 7; (siehe digitaler Anhang).....	16
Tabelle 4: Einteilung der Lasten nach DIN 15018	21
Tabelle 5: Eigenlastbeiwerte ϕ [3].....	22
Tabelle 6: Hublastbeiwerte ψ [3]	23
Tabelle 7: Einteilung der Lasten nach DIN EN 13001-2.....	29
Tabelle 8: dynamische Faktoren ϕ_i nach DIN EN 13001-2 [6]	30
Tabelle 9: Bestimmung von β_2 und $\phi_{2,min}$; [6].....	31
Tabelle 10: Bestimmung dynamischer Faktor ϕ_2 ; [6].....	32
Tabelle 11: Bestimmung dynamischer Faktor ϕ_5 ;[6].....	33
Tabelle 12: Schnittgrößen für LF1 bis LF5; (Anhang A).....	35
Tabelle 13: Schnittgrößen und Spannungen für LG1 bis LG6; (Anhang A).....	36
Tabelle 14: Schnittgrößen und Spannungen für LG11 bis LG16; (Anhang A).....	37
Tabelle 15: Auszug aus Kerbfalltabelle DIN 15018-1; [3].....	39
Tabelle 16: Berechnungskollektive; [3].....	40
Tabelle 17: Grundwerte der zulässigen Spannungen $\sigma_{D(-1)}$ für $\kappa = -1$ in N/mm ² ; [3]	40
Tabelle 18: Gleichungen für die zul. Oberspannungen in Abhängigkeit von κ und zul $\sigma_{D(-1)}$; [3].....	41
Tabelle 19: Auszug aus Kerbfallkatalog von DIN EN 1993-1-9:2005; [1].....	46
Tabelle 20: Empfehlungen für γ_{Mf} Faktoren; [1]	47
Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse von DIN 15018, DIN EN 13001-2 und DIN EN 1993-1-9.....	51
Tabelle 22: Querschnittshöhen h_i mit zugehörigem Widerstandsmoment $W_{y,i}$; (Anhang B)	55
Tabelle 23: Schnittgrößen und Widerstandsgrößen QS5, LG2	56
Tabelle 24: Querschnittswerte für Restquerschnitt QS5' (h=350); (Anhang B)	66
Tabelle 25: Schweißnahtvorbereitung der Doppel-HV-Naht; Quernähte 1+2;[27]	69
Tabelle 26: Schweißnahtvorbereitung der V-Naht; Vertikalnähte 3+4; [27]	70
Tabelle 27: Schweißnahtvorbereitung der HV-Naht; Längsnähte 5+6; [27].....	70
Tabelle 28: Querschnittswerte QS1	100
Tabelle 29: Querschnittswerte QS2	101
Tabelle 30: Querschnittswerte QS 3	102

Tabelle 31: Querschnittswerte QS 4	103
Tabelle 32: Querschnittswerte QS 5	104
Tabelle 33: Querschnittswerte QS 7	106
Tabelle 34: Querschnittswerte QS 8	107

16 Software

Stabwerksprogramm RSTAB, Programm – Version 7.01.3220 (Studentenversion),
Copyright © 2009 by Ing.-Software Dlubal

RSTAB- Zusatzmodul, DUENQ, Programm – Version 7.01.960 (Studentenversion),
Copyright © 2000 by Ing.-Software Dlubal

CAD-Programm, AutoCAD 2007, Autodesk Version 2007

Tabellenkalkulationsprogramm, EXCEL, Microsoft Office 2007, Excel 2007

17 Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Anwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Königslutter, den 11.05.2010

Holger Schumann

18 Anhang A

BASISANGABEN

BERECHNUNGSART

X Statik	X Theorie I. Ordnung (lineare Berechnung)
X Nachweis	X Theorie II. Ordnung (nichtlinear nach Timoshenko)
Dynamik	Theorie großer Verschiebungen (nichtlinear nach Newton-Raphson) Durchschlagproblem (nichtlinear nach Newton-Raphson)
X Lastfälle X LF-Gruppen X LF-Kombinationen	X Bemessungsfälle Dynamikfälle Knickfiguren

STRUKTURKENNWERTE

1D-Durchlaufträger	80Knoten	114Stäbe
2D-Stabwerk	1Materialien	0Seilstäbe
X 3D-Stabwerk	15Querschnitte	0Voutenstäbe
Trägerrost	2Stabendgelenke	0El. gebet. Stäbe
	2Stabteilungen	2Stabzüge

MATERIALIEN

Material Nr.	Material-Bezeichnung	Elast.-Modul E [kN/cm ²]	Schubmodul G [kN/cm ²]	Sp. Gewicht gamma [kN/m ³]	Wärmedehnz. alpha [1/°C]	Beiwert gamma-M [-]
1	Baustahl S 235 DIN 18800: 1990-11	21000.00	8100.00	78.50	1.2000E-05	1.100

QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Querschnitts-Bezeichnung	Mater. Nr.	I-T [cm ⁴] A [cm ²]	I-y/u [cm ⁴] A-y/u [cm ²]	I-z/v [cm ⁴] A-z/v [cm ²]	Hauptachsen alpha [°]	Q. - drehung alpha' [°]
1	DUENQ QS5	1	124.86 258.20	256790.03 28.51	130115.26 118.28	0.00	0.00
2	DUENQ QS2	1	29.96 115.32	21839.67 27.02	39732.88 46.95	0.00	-90.00
3	DUENQ QS2	1	29.96 115.32	21839.67 27.02	39732.88 46.95	0.00	90.00
4	DUENQ QS1	1	49.21 141.76	105259.43 52.38	36664.11 44.74	-45.00	0.00
5	DUENQ QS1	1	49.21 141.76	105259.43 52.38	36664.11 44.74	-45.00	90.00
6	DUENQ QS1	1	49.21 141.76	105259.43 52.38	36664.11 44.74	-45.00	-90.00
7	DUENQ QS1	1	49.21 141.76	105259.43 52.38	36664.11 44.74	-45.00	180.00
8	DUENQ QS8	1	171.71 144.75	122863.23 19.17	3447.36 67.62	0.00	0.00
9	DUENQ QS8	1	171.71 144.75	122863.23 19.17	3447.36 67.62	0.00	180.00
10	DUENQ QS3	1	19644.94 152.96	18162.66 61.07	53566.40 35.78	0.00	90.00
11	U 400	1	81.60 91.50	20350.00 15.00	846.00 49.94	0.00	180.00
12	U 400	1	81.60 91.50	20350.00 15.00	846.00 49.94	0.00	0.00
13	DUENQ QS7	1	85.47 241.60	192074.77 21.58	95004.53 138.81	0.00	0.00
14	U 350	1	61.20 77.30	12840.00 12.91	570.00 43.36	0.00	0.00
15	DUENQ QS4	1	29.98 91.12	56441.68 22.02	1432.58 47.80	3.83	0.00

KNOTENLAGER

Lager Nr.	Knoten Nr.	Folge	Lagerdrehung [°]			Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]					
			um X	um Y	um Z	u-X'	u-Y'	u-Z'	phi-X'	phi-Y'	phi-Z'
1	53	XYZ	0.00	0.00	0.00			X			
2	54	XYZ	0.00	0.00	0.00			X			

KNOTENLAGER

Lager Nr.	Knoten Nr.	Folge	Lagerdrehung [°]			Lagerung bzw. Feder [kN/m] [kNm/rad]					
			um X	um Y	um Z	u-X'	u-Y'	u-Z'	phi-X'	phi-Y'	phi-Z'
3	57	XYZ	0.00	0.00	0.00			X			
4	58	XYZ	0.00	0.00	0.00	X	X	X			

TABSÄTZE

Satz Nr.	Stabsatz-Bezeichnung	Typ	Stab Nr.	Länge [m]
1	QS9 U-400 Westseite	Stabzug	110,126,127	3.930
2	QS5 Mittelträger	Stabzug	50,64,55,46	3.930

LASTFÄLLE

LF-Nr.	LF-Bezeichnung	LF-Faktor	Eigenschaften des Lastfalls	Eigengewicht	Berechnungs-Theorie
1	G (Eigenlasten)	1.0000	Ständig	1.00	I. Ordnung
2	P0 (Hublast ohne Nutzlast)	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
3	P (Hublast)	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
4	Kr (Kranfahrt)	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
5	Ka (Katzfahrt)	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
11	f1 Masse Kran	1.0000	Ständig	1.00	I. Ordnung
12	f2* Masse Hublast ohne Nutzlast	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
13	f2 Masse Hublast	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
14	f4 Kranfahrt	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung
15	f5 Katzfahrt	1.0000	Veränderlich	-	I. Ordnung

LF1**G (Eigenlasten)****KNOTENLASTEN****LF1**

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	55	0.000	0.000	105.000	0.000	0.000	0.000

STABLASTEN**LF1**

Nr.	Beziehen auf	An Stäben Nr. An Stabs. Nr.	Last-Art	Last-Verlauf	Last-Richtung	Bezugs-Länge	Lastparameter		
							Symbol	Wert	Einheit
1	Stäbe	1-4,17,18,49,51,54,56	Kraft	Konstant	Z	Wahre Länge	p	4.380	kN/m
2	Stäbe	20,26,62,68,72,77	Kraft	Konstant	Z	Wahre Länge	p	5.000	kN/m

LF2**P0 (Hublast ohne Nutzlast)****KNOTENLASTEN****LF2**

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	55	0.000	0.000	175.000	0.000	0.000	0.000

LF3**P (Hublast)****KNOTENLASTEN****LF3**

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	55	0.000	0.000	495.000	0.000	0.000	0.000

LF4**Kr (Kranfahrt)****KNOTENLASTEN****LF4**

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z

KNOTENLASTEN

LF4

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	64	-9.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

LF5

Ka (Katzfahrt)

KNOTENLASTEN

LF5

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	64	0.000	-4.200	0.000	0.000	0.000	0.000

LF11

f1 Masse Kran

KNOTENLASTEN

LF11

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	55	0.000	0.000	105.000	0.000	0.000	0.000

STABLASTEN

LF11

Nr.	Beziehen auf	An Stäben Nr. An Stabs. Nr.	Last- Art	Last- Verlauf	Last- Richtung	Bezugs- Länge	Lastparameter		
							Symbol	Wert	Einheit
1	Stäbe	1-4,17,18,49,51, 54,56	Kraft	Konstant	Z	Wahre Länge	p	4.380	kN/m
2	Stäbe	20,26,62,68,72, 77	Kraft	Konstant	Z	Wahre Länge	p	5.000	kN/m

LF12

f2* Masse Hublast ohne Nutzlast

KNOTENLASTEN

LF12

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	55	0.000	0.000	175.000	0.000	0.000	0.000

LF13

f2 Masse Hublast

KNOTENLASTEN

LF13

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	55	0.000	0.000	495.000	0.000	0.000	0.000

LF14

f4 Kranfahrt

KNOTENLASTEN

LF14

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	64	-9.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

LF15

f5 Katzfahrt

KNOTENLASTEN

LF15

Nr.	An Knoten Nr.	Kraft [kN]			Moment [kNm]		
		P-X	P-Y	P-Z	M-X	M-Y	M-Z
1	64	0.000	-4.200	0.000	0.000	0.000	0.000

LF1 und LF11 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	1,33	1,78	16,07	0,01	1,49	0,60	12 - U 400
	40	0,730	1,33	1,78	15,55	0,01	13,04	-0,70	
126	40	0,000	4,28	0,00	0,84	0,00	3,63	-0,05	12 - U 400
	44	2,470	4,28	0,00	-0,93	0,00	3,52	-0,04	
127	44	0,000	0,47	-1,76	-14,92	-0,01	12,38	-0,69	12 - U 400
	47	0,730	0,47	-1,76	-15,45	-0,01	1,30	0,59	

LF2 und LF 12 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite									
110	41	0,000	0,96	0,94	7,95	0,00	0,79	0,31	12 - U 400
	40	0,730	0,96	0,94	7,95	0,00	6,59	-0,37	
126	40	0,000	2,60	0,00	0,06	0,00	1,28	-0,04	12 - U 400
	44	2,470	2,60	0,00	0,06	0,00	1,43	-0,02	
127	44	0,000	0,63	-0,91	-7,53	0,00	6,20	-0,35	12 - U 400
	47	0,730	0,63	-0,91	-7,53	0,00	0,70	0,31	

LF3 und LF13 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	2,70	2,66	22,48	0,01	2,24	0,89	12 - U 400
	40	0,730	2,70	2,66	22,48	0,01	18,65	-1,05	
126	40	0,000	7,35	-0,01	0,18	0,00	3,62	-0,10	12 - U 400
	44	2,470	7,35	-0,01	0,18	0,00	4,05	-0,07	
127	44	0,000	1,78	-2,56	-21,29	-0,01	17,53	-0,99	12 - U 400
	47	0,730	1,78	-2,56	-21,29	-0,01	1,99	0,88	

LF4 und LF 14 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	0,28	0,15	2,23	0,00	0,22	0,07	12 - U 400
	40	0,730	0,28	0,15	2,23	0,00	1,86	-0,04	
126	40	0,000	0,02	0,00	0,00	0,00	0,44	0,01	12 - U 400
	44	2,470	0,02	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	
127	44	0,000	0,99	-0,10	-2,08	0,00	1,85	-0,05	12 - U 400
	47	0,730	0,99	-0,10	-2,08	0,00	0,33	0,03	

LF5 und LF 15 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	-0,21	-0,03	1,28	0,00	0,07	0,00	12 - U 400
	40	0,730	-0,21	-0,03	1,28	0,00	1,00	0,02	
126	40	0,000	-0,03	0,01	0,12	0,00	-0,16	0,02	12 - U 400
	44	2,470	-0,03	0,01	0,12	0,00	0,15	-0,02	
127	44	0,000	0,23	-0,02	1,33	0,00	-1,04	-0,02	12 - U 400
	47	0,730	0,23	-0,02	1,33	0,00	-0,07	0,00	

LASTFALLGRUPPEN

LG Nr.	LG-Bezeichnung	Faktor	Lastfälle in LG	Berechnungs- Theorie
1		1.0000	LF1 + LF2	II. Ordnung
2		1.0000	1.4*LF3	II. Ordnung
3		1.0000	1.1*LF1 + 1.4*LF3	II. Ordnung
4		1.0000	1.1*LF1 + 1.4*LF3 + LF5	II. Ordnung
5		1.0000	1.1*LF1 + 1.4*LF3 + LF4	II. Ordnung
6		1.0000	1.1*LF1 + 1.4*LF3 + LF4 + LF5	II. Ordnung
11		1.0000	LF11 + LF12	II. Ordnung
12		1.0000	1.29*LF13	II. Ordnung
13		1.0000	1.1*LF11 + 1.29*LF13	II. Ordnung
14		1.0000	1.1*LF11 + 1.29*LF13 + 3*LF15	II. Ordnung
15		1.0000	1.1*LF11 + 1.29*LF13 + 3*LF14	II. Ordnung
16		1.0000	1.1*LF11 + 1.29*LF13 + 3*LF14 + 3*LF15	II. Ordnung

EINSTELLUNGEN FÜR NICHTLINEARE BERECHNUNG

LG Nr.	LG-Bezeichnung	Entlastende Wirkung durch Zugkräfte	Ergebnisse durch LF-Faktor zurückdividieren	Steifigkeit durch Gamma-M reduzieren
1	LF1 + LF2	X		X
2	1.4*LF3	X		X
3	1.1*LF1 + 1.4*LF3	X		X
4	1.1*LF1 + 1.4*LF3 + LF5	X		X
5	1.1*LF1 + 1.4*LF3 + LF4	X		X
6	1.1*LF1 + 1.4*LF3 + LF4 + LF5	X		X
11	LF11 + LF12	X		X
12	1.29*LF13	X		X
13	1.1*LF11 + 1.29*LF13	X		X
14	1.1*LF11 + 1.29*LF13 + 3*LF15	X		X
15	1.1*LF11 + 1.29*LF13 + 3*LF14	X		X
16	1.1*LF11 + 1.29*LF13 + 3*LF14 + 3*LF15	X		X

LG1 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			Querschnitt
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	
Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite									
110	41	0,000	2,28	2,72	24,02	0,01	2,29	0,92	12 - U 400
	40	0,730	2,28	2,72	23,49	0,01	19,63	-1,07	
126	40	0,000	6,87	-0,01	0,90	0,00	4,91	-0,08	12 - U 400
	44	2,470	6,87	-0,01	-0,87	0,00	4,96	-0,07	
127	44	0,000	1,10	-2,66	-22,45	-0,01	18,58	-1,04	12 - U 400
	47	0,730	1,10	-2,66	-22,97	-0,01	2,00	0,90	

LG2 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	3,79	3,73	31,47	0,02	3,14	1,25	12 - U 400
	40	0,730	3,79	3,73	31,47	0,02	26,11	-1,48	
126	40	0,000	10,29	-0,02	0,25	0,00	5,06	-0,14	12 - U 400
	44	2,470	10,29	-0,02	0,25	0,00	5,68	-0,10	
127	44	0,000	2,49	-3,58	-29,80	-0,01	24,54	-1,38	12 - U 400
	47	0,730	2,49	-3,58	-29,80	-0,01	2,79	1,23	

LG3 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	5,25	5,69	49,15	0,03	4,78	1,91	12 - U 400
	40	0,730	5,25	5,69	48,57	0,03	40,45	-2,24	
126	40	0,000	14,99	-0,02	1,17	0,00	9,06	-0,19	12 - U 400
	44	2,470	14,99	-0,02	-0,77	0,00	9,55	-0,14	
127	44	0,000	3,01	-5,52	-46,22	-0,03	38,16	-2,15	12 - U 400
	47	0,730	3,01	-5,52	-46,79	-0,03	4,22	1,88	

LG4 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	5,03	5,66	50,43	0,03	4,85	1,91	12 - U 400
	40	0,730	5,03	5,66	49,86	0,03	41,45	-2,22	
126	40	0,000	14,96	-0,01	1,30	0,00	8,90	-0,17	12 - U 400
	44	2,470	14,96	0,00	-0,64	0,00	9,70	-0,16	
127	44	0,000	3,24	-5,54	-44,89	-0,02	37,13	-2,16	12 - U 400
	47	0,730	3,24	-5,54	-45,47	-0,02	4,15	1,88	

LG5 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	5,53	5,84	51,38	0,03	5,00	1,98	12 - U 400
	40	0,730	5,53	5,84	50,81	0,03	42,31	-2,29	
126	40	0,000	15,01	-0,02	1,18	0,00	9,50	-0,19	12 - U 400
	44	2,470	15,01	-0,01	-0,77	0,00	10,00	-0,15	
127	44	0,000	4,00	-5,62	-48,30	-0,03	40,02	-2,19	12 - U 400
	47	0,730	4,00	-5,62	-48,88	-0,03	4,55	1,91	

LG6 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	5,32	5,81	52,67	0,03	5,07	1,97	12 - U 400
	40	0,730	5,32	5,81	52,09	0,03	43,31	-2,27	
126	40	0,000	14,98	0,00	1,30	0,00	9,33	-0,17	12 - U 400
	44	2,470	14,98	0,00	-0,64	0,00	10,15	-0,16	
127	44	0,000	4,22	-5,64	-46,98	-0,03	38,98	-2,21	12 - U 400
	47	0,730	4,22	-5,64	-47,55	-0,03	4,48	1,91	

LG11 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	2,28	2,72	24,02	0,01	2,29	0,92	12 - U 400
	40	0,730	2,28	2,72	23,49	0,01	19,63	-1,07	
126	40	0,000	6,87	-0,01	0,90	0,00	4,91	-0,08	12 - U 400
	44	2,470	6,87	-0,01	-0,87	0,00	4,96	-0,07	
127	44	0,000	1,10	-2,66	-22,45	-0,01	18,58	-1,04	12 - U 400
	47	0,730	1,10	-2,66	-22,97	-0,01	2,00	0,90	

LG12 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	3,49	3,43	29,00	0,02	2,89	1,15	12 - U 400
	40	0,730	3,49	3,43	29,00	0,02	24,06	-1,36	
126	40	0,000	9,48	-0,02	0,23	0,00	4,67	-0,13	12 - U 400
	44	2,470	9,48	-0,02	0,23	0,00	5,23	-0,09	
127	44	0,000	2,29	-3,30	-27,46	-0,01	22,61	-1,27	12 - U 400
	47	0,730	2,29	-3,30	-27,46	-0,01	2,57	1,14	

LG13 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	4,95	5,40	46,68	0,03	4,53	1,81	12 - U 400
	40	0,730	4,95	5,40	46,10	0,03	38,40	-2,13	
126	40	0,000	14,19	-0,02	1,15	0,00	8,66	-0,18	12 - U 400
	44	2,470	14,19	-0,02	-0,79	0,00	9,11	-0,13	
127	44	0,000	2,81	-5,24	-43,88	-0,02	36,24	-2,04	12 - U 400
	47	0.730	2.81	-5.24	-44.45	-0.02	4.00	1.78	

LG14 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	4,31	5,30	50,52	0,03	4,74	1,80	12 - U 400
	40	0,730	4,31	5,30	49,95	0,03	41,41	-2,06	
126	40	0,000	14,10	0,02	1,53	0,00	8,18	-0,13	12 - U 400
	44	2,470	14,10	0,03	-0,41	0,00	9,56	-0,19	
127	44	0,000	3,50	-5,30	-39,89	-0,02	33,12	-2,09	12 - U 400
	47	0,730	3,50	-5,30	-40,47	-0,02	3,79	1,78	

LG15 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	5,80	5,85	53,38	0,03	5,21	2,01	12 - U 400
	40	0,730	5,80	5,86	52,81	0,03	43,97	-2,26	
126	40	0,000	14,24	-0,01	1,16	0,00	9,97	-0,16	12 - U 400
	44	2,470	14,24	0,00	-0,78	0,00	10,45	-0,15	
127	44	0,000	5,78	-5,55	-50,13	-0,03	41,79	-2,17	12 - U 400
	47	0,730	5,78	-5,55	-50,71	-0,03	4,99	1,87	

LG16 Schnittgrößen Stabsatz 1

Stab	Knoten	Stelle	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
Nr.	Nr.	x [m]	N	V _y / V _u	V _z / V _v	M _T	M _y / M _u	M _z / M _v	Querschnitt
	Stabsatz Nr. 1: QS9 U-400 Westseite								
110	41	0,000	5,16	5,75	57,23	0,03	5,41	2,00	12 - U 400
	40	0,730	5,16	5,76	56,65	0,03	46,98	-2,20	
126	40	0,000	14,16	0,04	1,54	0,00	9,49	-0,11	12 - U 400
	44	2,470	14,16	0,04	-0,40	0,00	10,90	-0,20	
127	44	0,000	6,46	-5,61	-46,15	-0,02	38,68	-2,22	12 - U 400
	47	0,730	6,46	-5,61	-46,73	-0,02	4,78	1,87	

STAHL FA1 Spannungsanalyse LG1

BASISANGABEN

Zu bemessende Stäbe:	Alle
Zu bemessende Stabsätze:	Alle
Zu bemessende Lastfallgruppen:	LG1 LF1 + LF2

DETAILS

Örtlich begrenzte Plastizierung berücksichtigen:
Normalspannungen mit Alpha-pl berechnen:

FAKTOREN FÜR SIGMA-V

Sigma	1.00
Tau	3.00

Vereinfachte Berücksichtigung exzentrischer Lastenleitung:

MATERIALIEN

Mat.-Nr.	Material-Bezeichnung	Teilsich.-Faktor gamma-M [-]	Streckgrenze f-yk [kN/cm²]	Manuell	Grenzspannungen [kN/cm²]		
					grenz sigma-x	grenz tau	grenz sigma-v
1	Baustahl S 235	1.10	24.00		21.82	12.60	21.82

QUERSCHNITTE

Quer.-Nr.	Mat.-Nr.	Querschnittsbezeichnung	I-t [cm⁴] A [cm²]	I-y [cm⁴] Alpha-pl,y	I-z [cm⁴] Alpha-pl,z	Kommentar
1	1	DUENQ QS5	124.86 258.20	256790.00 1.341	130115.00 1.266	
12	1	U 400	81.60 91.50	20350.00 1.062	846.00 1.901	

SPANNUNGEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	Stab	x-Stelle	S-Punkt	Last-	Spannungsart	Spannung [kN/cm^2]		Aus-	
	Nr.	[m]	Nr.	fall		vorh	zul	nutzung	
1	QS9 U-400 Westseite (Stab Nr. 110,126,127)								
	110	0.730	6	LG1	Sigma gesamt	3.01	16.00	0.19	
	110	0.000	9	LG1	Tau gesamt	0.54	9.20	0.06	
	110	0.730	6	LG1	Sigma-v	3.01	16.00	0.19	
2	QS5 Mittelträger (Stab Nr. 46,50,55,64)								
	55	0.250	59	LG1	Sigma gesamt	4.55	16.00	0.28	
	55	0.000	46	LG1	Tau gesamt	1.26	9.20	0.14	
	55	0.250	48	LG1	Sigma-v	4.64	16.00	0.29	

MASSGEBENDE SCHNITTGRÖSSEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	x-Stelle [m]	Lastfall	Kräfte [kN]			Momente [kNm]		
			N	V-y	V-z	M-T	M-y	M-z
1	0.730	LG1	2.28	2.72	23.49	0.01	19.63	-1.07
2	0.250	LG1	9.23	0.00	140.25	0.00	247.51	0.00

STÜCKLISTE STABSATZWEISE

Position Nr.	Stabsatz Bezeichnung	Anzahl Stabsatz	Länge [m]	G-Länge [m]	Oberfläche [m²]	Volumen [m³]	E-Gewicht [kg/m]	Gewicht [kg]	G-Gewicht [t]
1	QS9 U-400 Westseite	1	3.93	3.93	4.65	0.04	71.83	282.28	0.282
2	QS5 Mittelträger	1	3.93	3.93	19.41	0.10	202.69	796.56	0.797
Summe		2		7.86	24.05	0.14			1.079

STAHL FA6 Spannungsanalyse LG6

SPANNUNGEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	Stab	x-Stelle	S-Punkt	Last-	Spannungsart	Spannung [kN/cm²]		Aus-	
	Nr.	[m]	Nr.	fall		vorh	zul	nutzung	
1	QS9 U-400 Westseite (Stab Nr. 110,126,127)								
	110	0.730	6	LG6	Sigma gesamt	6.55	16.00	0.41	
	110	0.000	9	LG6	Tau gesamt	1.19	9.20	0.13	
	110	0.730	6	LG6	Sigma-v	6.55	16.00	0.41	
2	QS5 Mittelträger (Stab Nr. 46,50,55,64)								
	55	0.250	23	LG6	Sigma gesamt	12.97	16.00	0.81	
	55	0.000	16	LG6	Tau gesamt	3.63	9.20	0.23	
	55	0.250	18	LG6	Sigma-v	13.24	16.00	0.83	

MASSGEBENDE SCHNITTGRÖSSEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	x-Stelle [m]	Last- fall	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
			N	V-y	V-z	M-T	M-y	M-z	
1	0.730	LG6	5.32	5.81	52.09	0.03	43.31	-2.27	
2	0.250	LG6	24.52	-0.06	405.05	0.00	705.37	0.20	

STAHL FA11 Spannungsanalyse LG11

SPANNUNGEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	Stab	x-Stelle	S-Punkt	Last-	Spannungsart	Spannung [kN/cm^2]		Aus-	
	Nr.	[m]	Nr.	fall		vorh	grenz	nutzung	
1	QS9 U-400 Westseite (Stab Nr. 110,126,127)								
	110	0.730	6	LG11	Sigma gesamt	3.01	21.82	0.14	
	110	0.000	9	LG11	Tau gesamt	0.54	12.60	0.04	
	110	0.730	6	LG11	Sigma-v	3.01	21.82	0.14	
2	QS5 Mittelträger (Stab Nr. 46,50,55,64)								
	55	0.250	59	LG11	Sigma gesamt	4.55	21.82	0.21	
	55	0.000	46	LG11	Tau gesamt	1.26	12.60	0.10	
	55	0.250	48	LG11	Sigma-v	4.64	21.82	0.21	

MASSGEBENDE SCHNITTGRÖSSEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	x-Stelle [m]	Last- fall	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
			N	V-y	V-z	M-T	M-y	M-z	
1	0.730	LG11	2.28	2.72	23.49	0.01	19.63	-1.07	
2	0.250	LG11	9.23	0.00	140.25	0.00	247.51	0.00	

STAHL

FA16

Spannungsanalyse LG16

SPANNUNGEN STABSATZWEISE

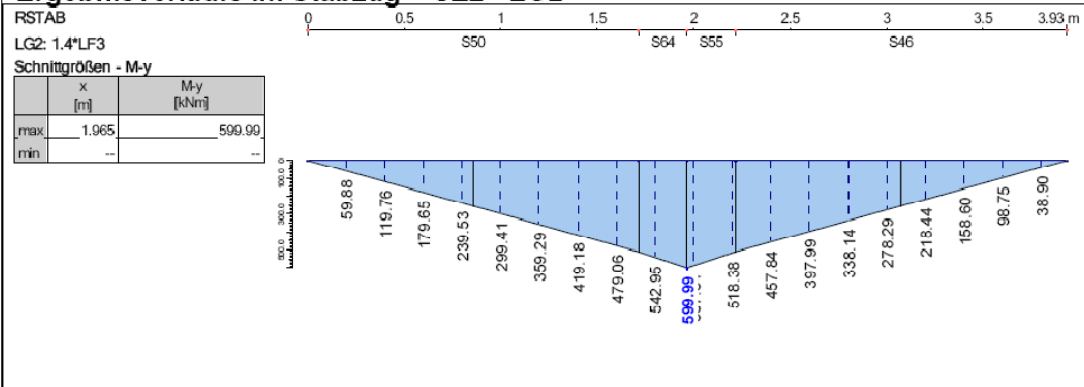
Stabsatz Nr.	Stab	x-Stelle	S-Punkt	Last-	Spannungsart	Spannung [kN/cm^2]		Aus-	
	Nr.	[m]	Nr.	fall		vorh	grenz	nutzung	
1	QS9 U-400 Westseite (Stab Nr. 110,126,127)								
	110	0.730	6	LG16	Sigma gesamt	6.84	21.82	0.31	
	110	0.000	9	LG16	Tau gesamt	1.30	12.60	0.10	
	110	0.730	6	LG16	Sigma-v	6.84	21.82	0.31	
2	QS5 Mittelträger (Stab Nr. 46,50,55,64)								
	55	0.250	23	LG16	Sigma gesamt	12.10	21.82	0.55	
	55	0.000	16	LG16	Tau gesamt	3.39	12.60	0.27	
	55	0.250	18	LG16	Sigma-v	12.35	21.82	0.57	

MASSGEBENDE SCHNITTGRÖSSEN STABSATZWEISE

Stabsatz Nr.	x-Stelle [m]	Last- fall	Kräfte [kN]			Momente [kNm]			
			N	V-y	V-z	M-T	M-y	M-z	
1	0.730	LG16	5.16	5.76	56.65	0.03	46.98	-2.20	
2	0.250	LG16	22.89	-0.17	377.69	0.00	657.84	0.61	

Biegemomentenverlauf M_y für QS 5, LG3; Teilung $x = 20\text{cm}$:

■ Ergebnisverläufe im Stabzug - SZ2 - LG2



19 Anhang B

QUERSCHNITTSKENNWERTE mit DYNQ 7 für QS 5 und h_i QS 5 mit $h=200\text{mm}$

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	162.20	cm^2	
Schubflächen	A-y	53.90	cm^2	
	A-z	24.27	cm^2	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	6.68	cm	
Trägheitsmomente	I-y	11163.10	cm^4	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	68174.80	cm^4	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-10.29	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-16.97	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	888.34	cm^3	im Abstand 125.66 mm
	W-y,min	-1501.68	cm^3	im Abstand -74.34 mm
	W-z,max	2272.49	cm^3	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-2272.49	cm^3	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit $h=250\text{mm}$

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	170.20	cm^2	
Schubflächen	A-y	50.51	cm^2	
	A-z	32.04	cm^2	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	8.64	cm	
Trägheitsmomente	I-y	18440.80	cm^4	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	73336.50	cm^4	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-12.98	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-21.62	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	1181.60	cm^3	im Abstand 156.07 mm
	W-y,min	-1963.18	cm^3	im Abstand -93.93 mm
	W-z,max	2444.55	cm^3	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-2444.55	cm^3	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit $h=300\text{mm}$

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	178.20	cm^2	
Schubflächen	A-y	47.45	cm^2	
	A-z	39.88	cm^2	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	10.65	cm	
Trägheitsmomente	I-y	27755.60	cm^4	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	78498.20	cm^4	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-15.65	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-26.30	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	1492.36	cm^3	im Abstand 185.98 mm
	W-y,min	-2434.38	cm^3	im Abstand -114.02 mm
	W-z,max	2616.61	cm^3	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-2616.61	cm^3	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit $h=350$

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	186.20	cm^2	
Schubflächen	A-y	44.67	cm^2	
	A-z	47.75	cm^2	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	12.70	cm	
Trägheitsmomente	I-y	39219.10	cm^4	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	83659.90	cm^4	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-18.30	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-31.00	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	1820.07	cm^3	im Abstand 215.48 mm
	W-y,min	-2915.50	cm^3	im Abstand -134.52 mm
	W-z,max	2788.66	cm^3	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-2788.66	cm^3	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h =400mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	194.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	42.16	cm ²	
	A-z	55.62	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	14.79	cm	
Trägheitsmomente	I-y	52941.00	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	88821.60	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-20.93	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-35.72	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	2164.34	cm ³	im Abstand 244.61 mm
	W-y,min	-3406.89	cm ³	im Abstand -155.39 mm
	W-z,max	2960.72	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-2960.72	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=450mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	202.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	39.87	cm ²	
	A-z	63.50	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	16.91	cm	
Trägheitsmomente	I-y	69029.50	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	93983.40	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-23.54	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-40.45	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	2524.81	cm ³	im Abstand 273.40 mm
	W-y,min	-3908.92	cm ³	im Abstand -176.59 mm
	W-z,max	3132.78	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-3132.78	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=500mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	210.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	37.79	cm ²	
	A-z	71.37	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	19.06	cm	
Trägheitsmomente	I-y	87591.60	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	99145.10	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-26.15	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-45.21	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	2901.20	cm ³	im Abstand 301.91 mm
	W-y,min	-4421.92	cm ³	im Abstand -198.09 mm
	W-z,max	3304.84	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-3304.84	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=550mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	218.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	35.89	cm ²	
	A-z	79.23	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	21.23	cm	
Trägheitsmomente	I-y	108733.00	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	104307.00	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-28.74	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-49.98	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	3293.28	cm ³	im Abstand 330.17 mm
	W-y,min	-4946.18	cm ³	im Abstand -219.83 mm
	W-z,max	3476.89	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-3476.89	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=600mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	226.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	34.16	cm ²	
	A-z	87.07	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	23.43	cm	
Trägheitsmomente	I-y	132559.00	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z

QS 5 mit h=600mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Lage des Schubmittelpunktes	I-z	109468.00	cm ⁴	
	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-31.33	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-54.76	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	3700.82	cm ³	im Abstand 358.19 mm
	W-y,min	-5481.96	cm ³	im Abstand -241.81 mm
	W-z,max	3648.95	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-3648.95	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=650mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	234.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	32.56	cm ²	
	A-z	94.90	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	25.65	cm	
Trägheitsmomente	I-y	159175.00	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	114630.00	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-33.91	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-59.56	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	4123.64	cm ³	im Abstand 386.01 mm
	W-y,min	-6029.47	cm ³	im Abstand -263.99 mm
	W-z,max	3821.01	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-3821.01	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=700mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	242.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	31.10	cm ²	
	A-z	102.71	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	27.89	cm	
Trägheitsmomente	I-y	188683.00	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	119792.00	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-36.48	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-64.37	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	4561.57	cm ³	im Abstand 413.64 mm
	W-y,min	-6588.90	cm ³	im Abstand -286.36 mm
	W-z,max	3993.06	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-3993.06	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5 mit h=750mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	250.20	cm ²	
Schubflächen	A-y	29.75	cm ²	
	A-z	110.50	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	30.14	cm	
Trägheitsmomente	I-y	221187.00	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	124954.00	cm ⁴	
Lage des Schubmittelpunktes	y-M,0	0.00	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	-39.05	cm	
	y-M	0.00	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
	z-M	-69.19	cm	
Widerstandsmomente	W-y,max	5014.47	cm ³	im Abstand 441.10 mm
	W-y,min	-7160.40	cm ³	im Abstand -308.90 mm
	W-z,max	4165.12	cm ³	im Abstand 300.00 mm
	W-z,min	-4165.12	cm ³	im Abstand -300.00 mm

QS 5' mit h=350mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Querschnittsfläche	A	138.10	cm ²	
Schubflächen	A-y	50.10	cm ²	
	A-z	20.49	cm ²	
	A-u	48.68	cm ²	
	A-v	30.28	cm ²	
Lage des Schwerpunktes	y-S,0	-8.37	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-S,0	8.56	cm	
Trägheitsmomente	I-y	24512.50	cm ⁴	bezogen auf die Schwerachsen y, z
	I-z	45645.20	cm ⁴	
	I-yz	-17947.90	cm ⁴	
Hauptachseneckwinkel	alfa	-29.76°		positiv im Uhrzeigersinn
Hauptträgheitsmomente	I-u	14251.60	cm ⁴	bezogen auf die Hauptachsen u, v im S

QS 5' mit h=350mm

Bezeichnung	Symbol	Größe	Einheit	Kommentar
Lage des Schubmittelpunktes	I-v	55906.10	cm ⁴	
	y-M,0	-28.46	cm	bezogen auf den Nullpunkt
	z-M,0	0.72	cm	
	y-M	-20.09	cm	bezogen auf den Schwerpunkt S
Wölbwiderstände	z-M	-7.84	cm	
	I-omega,S	18569200.00	cm ⁶	bezogen auf den Schwerpunkt S
	I-omega,M	519703.00	cm ⁶	bezogen auf den Schubmittelpunkt M
Widerstandsmomente	r-omega,M	-1.16		
	W-u,max	749.63	cm ³	im Abstand 190.11 mm
	W-u,min	-757.33	cm ³	im Abstand -188.18 mm
	W-v,max	1473.68	cm ³	im Abstand 379.36 mm
	W-v,min	-1773.50	cm ³	im Abstand -315.23 mm
	W-y,max	954.28	cm ³	im Abstand 256.87 mm
	W-y,min	-2632.07	cm ³	im Abstand -93.13 mm
	W-z,max	1189.47	cm ³	im Abstand 383.74 mm
	W-z,min	-2110.69	cm ³	im Abstand -216.26 mm

20 Anhang C

QS1 Eckstütze

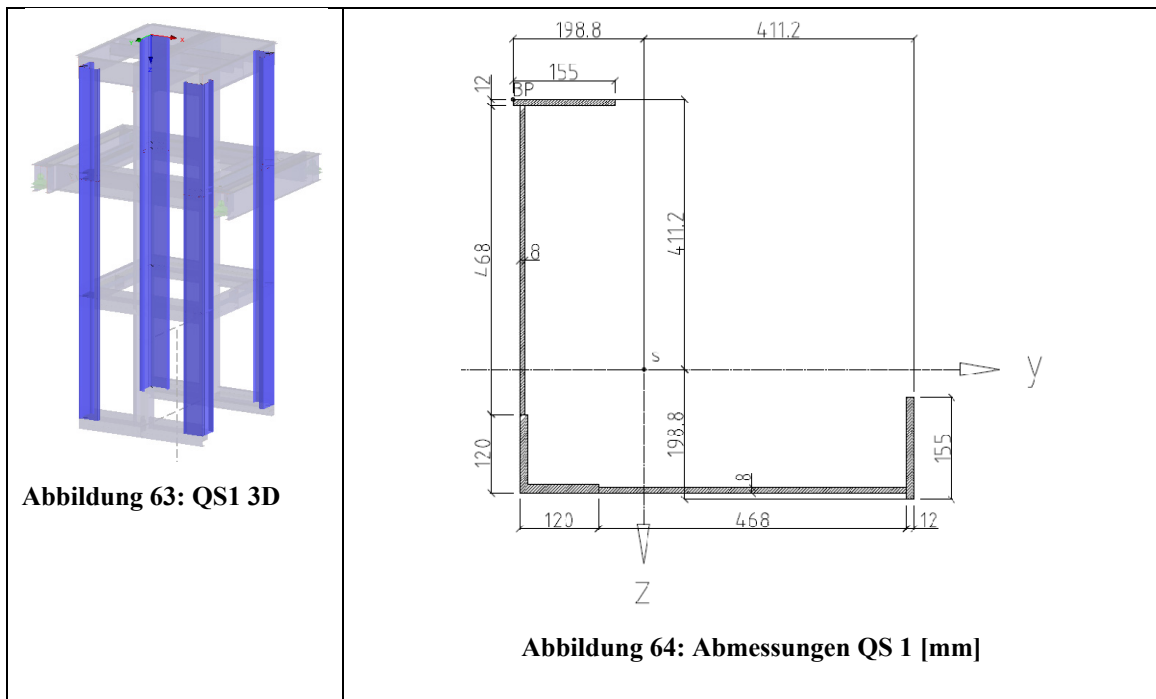


Tabelle 28: Querschnittswerte QS1

bi cm	hi cm	zi cm	Ai bixhi	Azi Aixzi	zsi zi-zs	Iyi bxi ³ /12	"z-Steiner" Aix(zsi) ²	yi cm	Ayi Aixyi	ysi yi-zs	Izi b ³ xh/12	y-Steiner Aix(ysi) ²
15,5	1,2	0,6	18,6	11,16	-40,52	2,23	30539	7,75	144,15	-12,13	372,39	2736,75
0,8	46,8	24,6	37,44	921,024	-16,52	6833,55	10217,77	1,4	52,416	-18,48	2	12786,15
1,3	12	54	15,6	842,4	12,88	187,2	2587,95	1,65	25,74	-18,23	2,2	5184,39
10,7	1,3	59,35	13,91	825,5585	18,23	1,96	4622,75	7,65	106,4115	-12,23	132,71	2080,56
46,8	0,8	59,6	37,44	2231,424	18,48	2	12786,15	36,4	1362,816	16,52	6833,55	10217,77
1,2	15,5	53,25	18,6	990,45	12,13	372,39	2736,75	60,4	1123,44	40,52	2,23	30538,79
Σ			141,59	5822,0165		7399,33	63490,37	Σ	2814,9735		7345,08	63544,41

Berechnung QS1:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{5822,02 \text{ cm}^3}{141,59 \text{ cm}^2} = 41,12 \text{ cm} \quad y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{2814,97 \text{ cm}^3}{141,59 \text{ cm}^2} = 19,88 \text{ cm}$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 7399,33 \text{ cm}^4 + 63490,37 \text{ cm}^4 = 70890 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 7345,08 \text{ cm}^4 + 63544,41 \text{ cm}^4 = 70890 \text{ cm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{70890 \text{ cm}^4}{60 \text{ cm}} = 1181,5 \text{ cm}^3$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{70890 \text{ cm}^4}{60 \text{ cm}} = 1181,5 \text{ cm}^3$$

QS2 Führungsmast

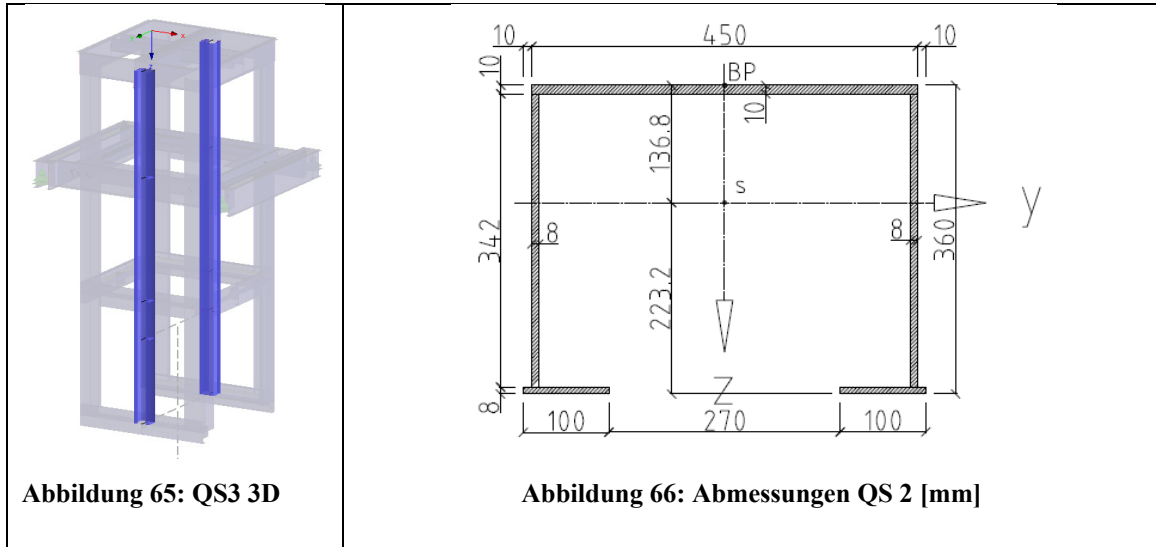


Tabelle 29: Querschnittswerte QS2

bi cm	hi cm	zi cm	Ai bixhi	Azi Aixzi	zsi zi-zs	Iyi b ³ h ³ /12	"z-Steiner" Aix(zsi) ²	yi cm	Ayi Aixyi	ysi yi-zs	Izi b ³ h ³ /12	y-Steiner Aix(ysi) ²
45	1	0,5	45	22,5	-13,18	3,75	7817	0	0	0	7593,75	0
0,8	34,2	18,1	27,36	495,216	4,42	2666,78	534,52	-22,1	-604,656	-22,1	1,46	13362,9
0,8	34,2	18,1	27,36	495,216	4,42	2666,78	534,52	22,1	604,656	22,1	1,46	13362,9
10	0,8	35,6	8	284,8	21,92	0,43	3843,89	-18,5	-148	-18,5	66,67	2738
10	0,8	35,6	8	284,8	21,92	0,43	3843,89	18,5	148	18,5	66,67	2738
Σ			115,72	1582,532		5338,17	16573,82	Σ	0		7730,01	32201,8

Berechnung QS2:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{1582,53 \text{ cm}^3}{115,72 \text{ cm}^2} = 13,68 \text{ cm} \quad y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = 0$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 5338,17 \text{ cm}^4 + 16573,82 \text{ cm}^4 = 21912 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 7730,01 \text{ cm}^4 + 32201,8 \text{ cm}^4 = 39932 \text{ cm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{21912 \text{ cm}^4}{22,3 \text{ cm}} = 983 \text{ cm}^3$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{39932 \text{ cm}^4}{23,5 \text{ cm}} = 1699 \text{ cm}^3$$

QS 3 Querriegel Schacht

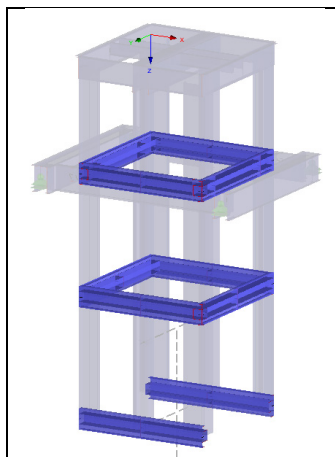


Abbildung 67: QS 3D

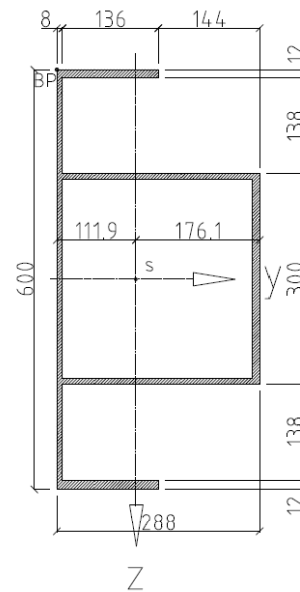


Abbildung 68: Abmessungen QS 3 [mm]

Tabelle 30: Querschnittswerte QS 3

bi cm	hi cm	zi cm	Ai bixhi	Azi Aixzi	zsi zi-zs	Iyi bxi ³ /12	"z-Steiner" Aix(zsi) ²	yi cm	Ayi Aixyi	ysi yi-zs	Izi bi ³ xh/12	y-Steiner Aix(ysi) ²
13,6	1,2	0,6	16,32	9,792	-29,4	1,96	14106	7,2	117,504	-3,99	251,55	259,82
13,6	1,2	59,4	16,32	969,408	29,4	1,96	14106,36	7,2	117,504	-3,99	251,55	259,82
0,8	60	30	48	1440	0	14400	0	0,4	19,2	-10,79	2,56	5588,36
1	30	30	30	900	0	2250	0	28,3	849	17,11	2,5	8782,56
27	0,8	15,4	21,6	332,64	-14,6	1,15	4604,26	14,3	308,88	3,11	1312,2	208,92
27	0,8	44,6	21,6	963,36	14,6	1,15	4604,26	14,3	308,88	3,11	1312,2	208,92
Σ			153,84	4615,2		16656,22	37420,88	Σ	1720,968		3132,56	15308,4

Berechnung QS 3:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{4615,2 \text{ cm}^3}{153,84 \text{ cm}^2} = 30 \text{ cm} \quad y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{1720,97 \text{ cm}^3}{153,84 \text{ cm}^2} = 11,19 \text{ cm}$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 16656,22 \text{ cm}^4 + 37420,88 \text{ cm}^4 = 54077 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 3132,56 \text{ cm}^4 + 15308,4 \text{ cm}^4 = 18441 \text{ cm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{54077 \text{ cm}^4}{30 \text{ cm}} = 1803 \text{ cm}^3$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{18441 \text{ cm}^4}{17,61 \text{ cm}} = 1047 \text{ cm}^3$$

QS 4 Katzgerüst oben

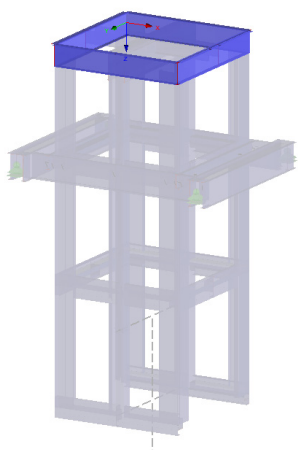


Abbildung 69: QS 4 3D

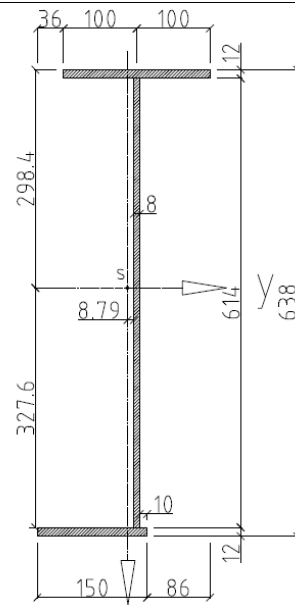


Abbildung 70: Abmessungen QS 4 [mm]

Tabelle 31: Querschnittswerte QS 4

bi cm	hi cm	zi cm	Ai bixhi	Azi Aixzi	zsi zi-zs	Iyi bxi ³ /12	"z-Steiner" Aix(zsi) ²	yi cm	Ayi Aixyi	ysi yi-zs	Izi b ³ xh/12	y-Steiner Aix(ysi) ²
20	1,2	0,6	24	14,4	-29,24	2,88	20519	10	240	1,21	800	35,14
0,8	61,4	31,9	49,12	1566,928	2,06	15431,7	208,45	10	491,2	1,21	2,62	71,92
15	1,2	63,2	18	1137,6	33,36	2,16	20032,01	3,9	70,2	-4,89	337,5	430,42
			Σ	91,12	2718,928		15436,74	Σ	801,4		1140,12	537,48

Berechnung QS4:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{2718,93 \text{ cm}^3}{91,12 \text{ cm}^2} = \underline{29,84 \text{ cm}} \quad y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{801,4}{91,12} = \underline{8,79 \text{ cm}}$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 15436,74 \text{ cm}^4 + 40759,46 \text{ cm}^4 = \underline{56196 \text{ cm}^4}$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 1140,12 \text{ cm}^4 + 537,48 \text{ cm}^4 = \underline{1677,6 \text{ cm}^4}$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{56196 \text{ cm}^4}{32,76 \text{ cm}} = \underline{1715 \text{ cm}^3}$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{1678 \text{ cm}^4}{10,88 \text{ cm}} = \underline{154 \text{ cm}^3}$$

QS 5 Mittelträger / Trommelträger

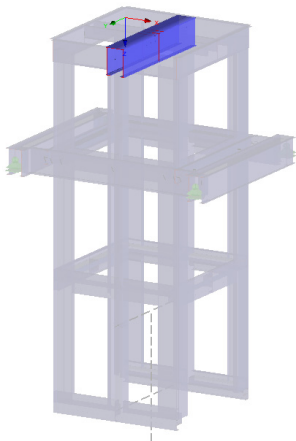


Abbildung 71: QS 5 3D

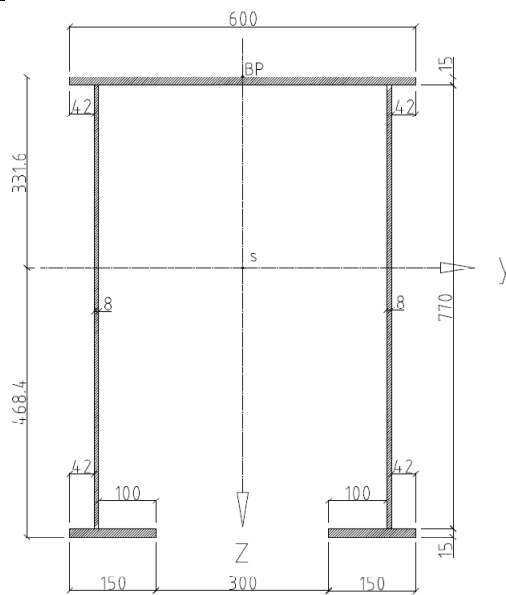


Abbildung 72: Abmessungen QS 5 [mm]

Tabelle 32: Querschnittswerte QS 5

bi cm	hi cm	zi cm	Ai bixhi	Azi Aixzi	zsi zi-zs	Iyi bxi ³ /12	"z-Steiner" Aix(zsi) ²	yi cm	Ayi Aixyi	ysi yi-zs	Izi b ³ xh/12	y-Steiner Aix(y _{si}) ²
60	1,5	0,75	90	67,5	-32,41	16,88	94537	0	0	0	27000	0
0,8	77	40	61,6	2464	6,84	30435,53	2881,99	-25,4	-1564,64	-25,4	3,29	39741,86
0,8	77	40	61,6	2464	6,84	30435,53	2881,99	25,4	1564,64	25,4	3,29	39741,86
15	1,5	79,25	22,5	1783,125	46,09	4,22	47796,48	-22,5	-506,25	-22,5	421,88	11390,63
15	1,5	79,25	22,5	1783,125	46,09	4,22	47796,48	22,55	507,375	22,55	421,88	11441,31
Σ			258,2	8561,75		60896,38	195893,94	Σ	1,125		27850,34	102315,66

Berechnung QS5:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{8561,75 \text{ cm}^3}{258,2 \text{ cm}^2} = 33,16 \text{ cm} \quad y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = 0$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 60896,38 \text{ cm}^4 + 195893,94 \text{ cm}^4 = 256790 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 27850,34 \text{ cm}^4 + 102315,66 \text{ cm}^4 = 130166 \text{ cm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{256790 \text{ cm}^4}{46,84 \text{ cm}} = 5482 \text{ cm}^3$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{130166 \text{ cm}^4}{30 \text{ cm}} = 4339 \text{ cm}^3$$

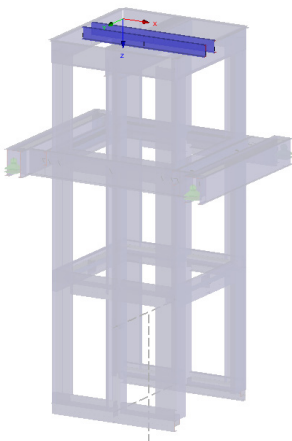
QS6 Querträger oberes Katzgerüst

Abbildung 73: QS6 3D

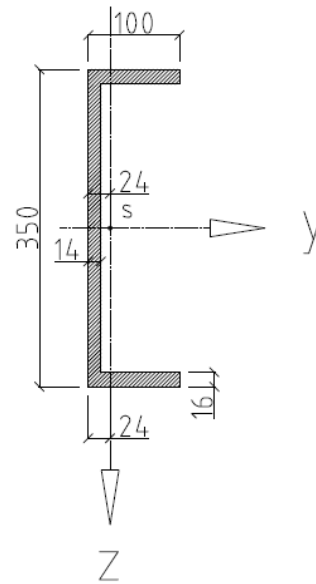


Abbildung 74: Abmessungen QS 6 [mm]

Querschnittswerte U-350 nach DIN 1026 (10.63:)

$$z_s = 17,5\text{cm}$$

$$y_s = 2,4\text{cm}$$

$$I_y = 12840\text{cm}^4$$

$$I_z = 570\text{cm}^4$$

$$W_y = 734\text{cm}^3$$

$$W_z = 75\text{cm}^3$$

QS 7 Katradträger

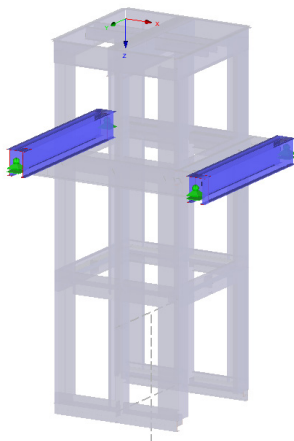


Abbildung 75: QS 7 3D

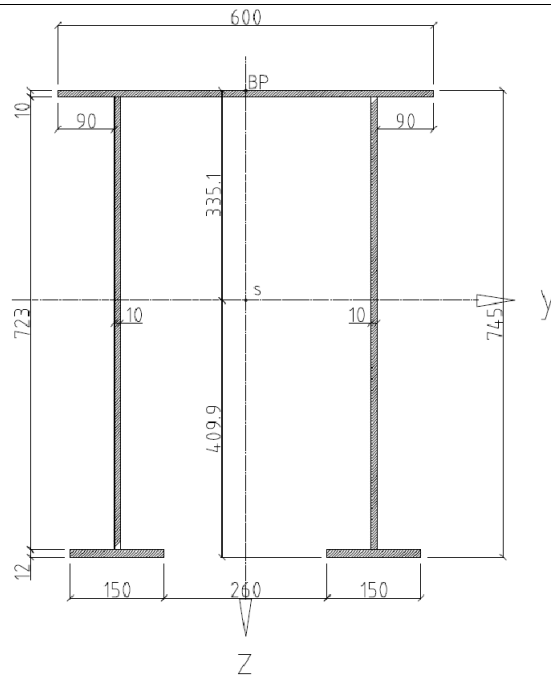


Abbildung 76: Abmessungen QS 7 [mm]

Tabelle 33: Querschnittswerte QS 7

bi	hi	zi	Ai	Azi	zsi	Iyi	"z-Steiner"	yi	Ayi	ysi	Izi	y-Steiner
cm	cm	cm	bixhi	Aixzi	zi-zs	bxxh ³ /12	Aix(zsi) ²	cm	Aixyi	yi-zs	b ³ xh/12	Aix(ysi) ²
60	1	0,5	60	30	-33,01	5	65380	0	0	0	18000	0
1	72,3	37,15	72,3	2685,945	3,64	31494,42	957,95	-20,5	-1482,15	-20,5	6,03	30384,08
1	72,3	37,15	72,3	2685,945	3,64	31494,42	957,95	20,5	1482,15	20,5	6,03	30384,08
15	1,2	73,9	18	1330,2	40,39	2,16	29364,34	-20,5	-369	-20,5	337,5	7564,5
15	1,2	73,9	18	1330,2	40,39	2,16	29364,34	20,5	369	20,5	337,5	7564,5
Σ			240,6	8062,29		62998,16	126024,58	Σ	0		18687,06	75897,16

Berechnung QS7:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{8062,29 \text{ cm}^3}{240,6 \text{ cm}^2} = 33,51 \text{ cm} \quad y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = 0$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 62998,16 \text{ cm}^4 + 126024,58 \text{ cm}^4 = 189023 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 18687,06 \text{ cm}^4 + 75897,16 \text{ cm}^4 = 94584 \text{ cm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{189023 \text{ cm}^4}{40,99 \text{ cm}} = 4611 \text{ cm}^3$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{94584 \text{ cm}^4}{30 \text{ cm}} = 3153 \text{ cm}^3$$

QS 8 Katradquerträger

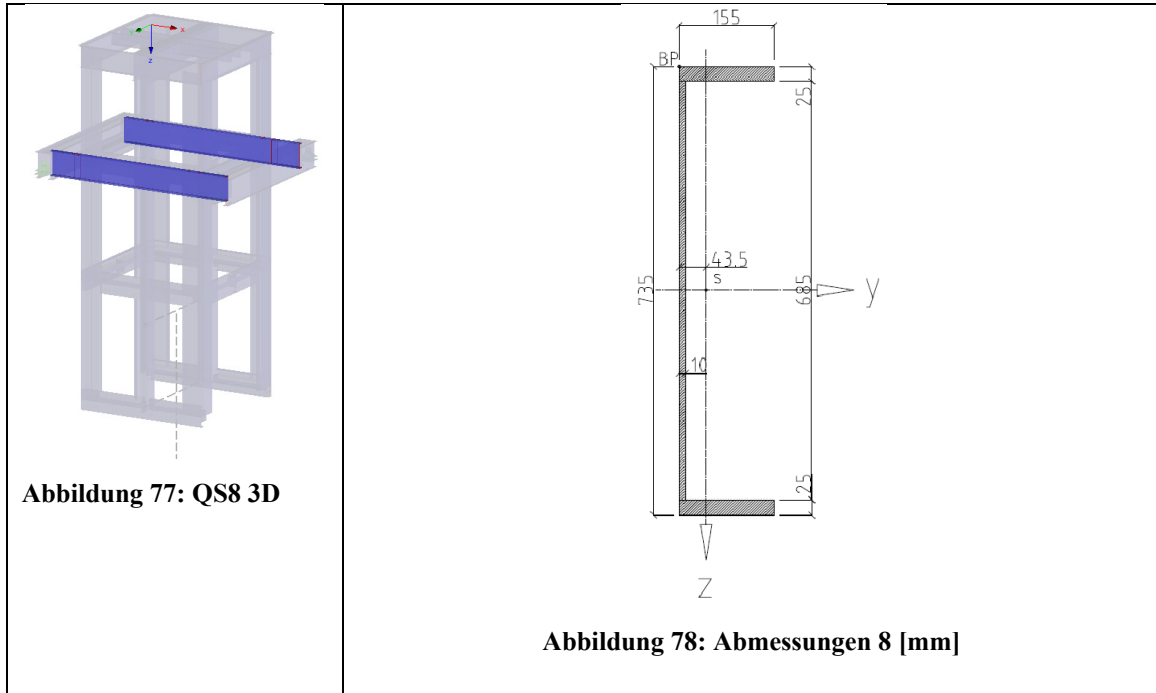


Tabelle 34: Querschnittswerte QS 8

bi	hi	zi	Ai	Azi	zsi	Iyi	"z-Steiner"	yi	Ayi	ysi	Izi	y-Steiner
cm	cm	cm	bixhi	Aixzi	zi-zs	b x h ³ /12	Aix(zsi) ²	cm	Aixyi	yi-zs	b ³ xh/12	Aix(yi) ²
15,5	2,5	1,25	38,75	48,4375	-35,5	20,18	48835	7,75	300,3125	3,4	775,81	447,95
15,5	2,5	72,25	38,75	2799,6875	35,5	20,18	48835	7,75	300,3125	3,4	775,81	447,95
1	68,5	36,75	68,5	2517,375	0	26784,93	0	0,5	34,25	-3,85	5,71	1015,34
		Σ	146	5365,5		26825,29	97670	Σ	634,875		1557,33	1911,24

Berechnung QS8:

$$z_s = \frac{\sum A \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{5365,5 \text{ cm}^3}{146 \text{ cm}^2} = 36,75 \text{ cm}$$

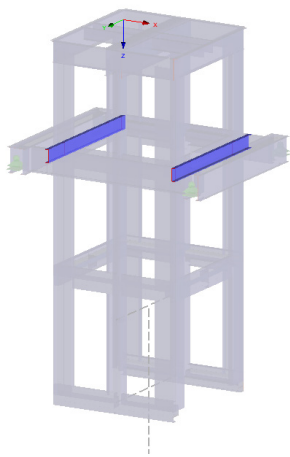
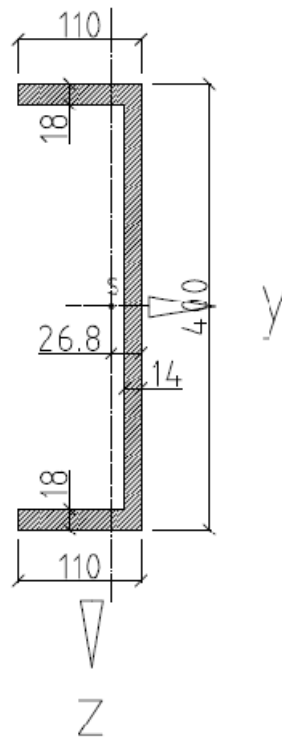
$$y_s = \frac{\sum A \cdot y_i}{\sum A_i} = \frac{634,88}{146} = 4,35 \text{ cm}$$

$$I_y = \sum I_{y,i} + \sum A \cdot (z_{s,i})^2 = 26825,29 \text{ cm}^4 + 97670 \text{ cm}^4 = 124495 \text{ cm}^4$$

$$I_z = \sum I_{z,i} + \sum A \cdot (y_{s,i})^2 = 1557,33 \text{ cm}^4 + 1911,24 \text{ cm}^4 = 3469 \text{ cm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{124495 \text{ cm}^4}{36,75 \text{ cm}} = 3388 \text{ cm}^3$$

$$W_z = \frac{I_z}{y} = \frac{3469 \text{ cm}^4}{11,5 \text{ cm}} = 311 \text{ cm}^3$$

QS9 Längsträger Katzrahmen (U-400 DIN 1026)**Abbildung 79: QS 3D****Abbildung 80: Abmessungen QS 9 [mm]****Querschnittswerte U-400 nach DIN 1026 (10.63):**

$$z_s = 20 \text{ cm}$$

$$y_s = 2,68 \text{ cm}$$

$$I_y = 20350 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 846 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 1020 \text{ cm}^3$$

$$W_z = 102 \text{ cm}^3$$